

Energiekonzept für den neuen Stadtteil Dietenbach

im Auftrag der Stadt Freiburg



Bildquelle: www.freiburg.de

Abschlussbericht

Projektleitung: M.Sc. Tobias Nusser

Bearbeitung: M.Sc. Matthias Stickel
M.Sc. Simone Idler

Stand: 28.10.2021

EGS-plan Ingenieurgesellschaft für Energie-, Gebäude- und Solartechnik mbH
Gropiusplatz 10 . D-70563 Stuttgart
Tel. +49 711 99 007 - 5 . Fax +49 711 99 007 - 99
info@egs-plan.de . www.egs-plan.de

NordLB Braunschweig . BLZ 250 500 00 . Kto.-Nr. 20 740 60
IBAN-Nr. DE48 2505 0000 0002 0740 60 . BIC-/SWIFT-Code: NOLADE 2HXXX
Ust.-IdNr. DE218431901 . Registergericht Stuttgart . HRB 22434

Geschäftsführer:
Dipl.-Ing. Jörg Baumgärtner
Dr.-Ing. Boris Mahler
Direktor:
Univ. Prof. Dr.-Ing. M. Norbert Fisch

211028 Abschlussbericht EK Dietenbach
E15331 02

Auftraggeber / Bauherr Stadt Freiburg
Fehrenbachallee 12
79106 Freiburg im Breisgau

Auftragnehmer EGS-Plan Ingenieurgesellschaft für
Energie-, Gebäude- und Solartechnik mbH
Gropiusplatz 10
70563 Stuttgart

Tel. +49 711 99 007 - 5
Fax +49 711 99 007 - 99
www.egs-plan.de
info@egs-plan.de

Projektleitung M.Sc. Tobias Nusser

Bearbeitung M.Sc. Matthias Stickel
M.Sc. Simone Idler

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	5
2	Aufgabenstellung und Vorgehensweise	7
2.1	Ziele und allgemeine Aufgabenbeschreibung	7
2.2	Vorgehensweise	7
3	Rahmenbedingungen	10
3.1	Plan- und Flächengrundlage / zeitlicher Rahmen	10
3.2	Bauliche Strukturen und Städtebau	11
3.3	Ökonomische Rahmenbedingungen	12
3.4	Energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen	12
4	Energiebedarfsermittlung und Potentialanalyse	13
4.1	Energiebedarf Gebäude	13
4.2	Energiebedarf Mobilität	14
4.3	Potentialanalyse	15
4.3.1	Nutzung von Solarenergie mit Photovoltaik	16
4.3.2	Grundwasserwärme	17
4.3.3	Abwasserwärme	19
5	Versorgungs- und Energiekonzept	20
5.1	Grundlagen der Variantenbetrachtung	20
5.2	Übersicht der Versorgungsvarianten	20
5.3	V1 – Dezentrale Wärmepumpen und Eisspeicher	21
5.4	V2 – Dietenbach Plus	23
5.5	V3 – Fernwärme Tiefengeothermie	25
5.6	V4 – Dietenbach KliEn - Klimaneutral und energiewendedenlich	26
6	Variantenvergleich und Bewertung	30
6.1	Endenergiebilanz	30
6.2	Klimabilanz	31
6.3	Investitionskosten	33
6.4	Jahresgesamtkosten	35
6.5	Sensitivitätsanalyse	38
6.5.1	Szenarienübersicht	38
6.5.2	Ergebnisse der Szenarienanalyse	38
7	Bewertung und Empfehlung	40
7.1	Gesamtbewertung mittels Bewertungsmatrix	40
7.2	Umsetzungsempfehlung	40
7.3	Sachstand Energieversorgung für den Bauabschnitt 1	41

7.4	Ausblick und nächste Schritte	41
8	Anhang	43
8.1	Klimaneutralität – Ziel für den Stadtteil Dietenbach	43
8.2	Grundlage Gebäudeflächen nach Bauabschnitten und Nutzungsformen	44
8.3	Spezifischer Energiebedarf nach Nutzungsformen (Erzeugernutzenergie)	44
8.4	Absoluter Energiebedarf nach Nutzungsformen	44
8.5	Durchlässigkeit Grundwasserleiter gemäß Gutachten KIT AGW	45
8.6	Variante 1 – Flächenbedarf Technik im Gebäude Umsetzungsbeispiel	46
8.7	Variante 1 – Flächenbedarf Eisspeicher in % der Baufeld-Grundfläche	47
8.8	Energiefluss-Diagramm Variante 1	48
8.9	Synoptische Darstellung – Anlagenschema Variante 2	49
8.10	Energiefluss-Diagramm Variante 2	50
8.11	Energiefluss-Diagramm Variante 3	51
8.12	Synoptische Darstellung – Anlagenschema Variante 4	52
8.13	Energiefluss-Diagramm Variante 4	53
8.14	Rahmenbedingungen Wirtschaftlichkeitsberechnung	54
8.15	Erweiterte Sensitivitätsanalyse	55
	Abbildungsverzeichnis	57
	Tabellenverzeichnis	57
	Anlagenverzeichnis	58

1 Zusammenfassung

Klimaschutz ist in Freiburg ein zentrales Element der städtischen Politik. Dies spiegelt sich auch in dem vom Gemeinderat beschlossenen Klimaschutzziel wider. Bis 2030 soll der Ausstoß der klimaschädlichen Emissionen um 50 % gegenüber dem Referenzjahr 1992 reduziert werden. Bis 2050 wird die vollständige Klimaneutralität angestrebt.

Mit der Entwicklung des neuen Stadtquartiers Dietenbach ist die einmalige Chance gegeben, die Weichenstellungen für eine nachhaltige und klimaneutrale Stadtentwicklung bereits von Beginn an in der Konzeption und Planung vorzunehmen. In Anlehnung an die städtischen Klimaschutzziele und angesichts der Langfristigkeit des Vorhabens soll für das neue Quartier die Klimaneutralität angestrebt werden.

Die aktuelle städtebauliche Planung der Projektgruppe Dietenbach sieht die Schaffung von neuem Wohn- und Lebensraum für 16.000 Personen mit rund 6.900 Wohneinheiten vor. Ergänzt wird dies durch Nutzungen wie Schulen, KiTa's und Gewerbe, die rund 25 % der Gebäudeflächen repräsentieren.

Die Analyse der Energiebedarfe erfolgte für die Bereich Wärme, Kälte, Nutzerstrom und Mobilität. Im Bereich Wärme resultiert ein Bedarf von rund 51 GWh/a und im Bereich Strom von rund 32 GWh/a. Für das Ziel der Klimaneutralität ist dieser Bedarf weitestgehend mit erneuerbaren Energien zu decken.

Im Rahmen der Potenzialanalyse sind darauffolgend die lokale Energieinfrastruktur untersucht und die erneuerbaren Potenziale vor Ort bewertet worden. Vor Ort und in unmittelbarer räumlicher Nähe sind vor allem die Solarenergie in Form von Photovoltaik, Grundwasserwärme und Abwasserwärme potenzielle Nutzungsoptionen. Als wichtiges Element aller Energiekonzepte steht die Solarenergienutzung auf den Gebäuden und dem Lärmschutzwall im Zentrum, mit einem Stromerzeugungspotenzial von 38 GWh/a.

Insgesamt vier Versorgungskonzepte sind im finalen Variantenvergleich gegenübergestellt. Die Gebäude aller Varianten besitzen dabei eine gute Gebäudehülle, die mindestens der Qualität des Freiburger Effizienzhaus 55 entspricht.

Die **Variante 1 „Dezentrale WP und Saisonalspeicherung mit Eisspeichern“** basiert auf den Konzeptansätzen aus dem Siegerentwurf des städtebaulichen Wettbewerbs. Über ein kaltes Nahwärmenetz und Eisspeicher, regeneriert durch Abwasserwärme, erfolgt die Versorgung der Wärmepumpen in den Gebäuden des BA 3 in der Nähe der Mundenhoferstraße. Die Wärmepumpen im restlichen Stadtteil (ohne BA 3) werden mit Hilfe von dezentralen kalten Nahwärmenetzen mit Regeneration durch PVT-Kollektoren (Kombination aus Photovoltaik und thermischer Solarnutzung) und dezentralen Eisspeichern auf Baufeldebene versorgt

Die **Variante 2 „Dietenbach Plus“** basiert auf einem kalten Nahwärmenetz, das das gesamte Stadtquartier erschließt. Analog zu Variante 1 befinden sich innerhalb der Baufelder dezentrale Wärmepumpen. Am Mundenhof wird eine Energiezentrale untergebracht, in der das kalte Nahwärmenetz betrieben und mit Abwasser- und Grundwasserwärme regeneriert wird. Auf jedem Baufeld wird eine Heizzentrale installiert, in denen Wärmepumpen die angeschlossenen Gebäude mit Wärme versorgen.

In der **Variante 3 „Tiefengeothermie“** stammt die gesamte Wärme für den Stadtteil Dietenbach aus einem Fernwärmenetz, das Wärme aus einem möglichen Tiefen-Geothermiekraftwerk bezieht. Für die Wärmeverteilung der Gebäude im Stadtteil wird hierfür ein Nahwärmenetz betrieben. Innerhalb der Baufelder werden Übergabestationen verwendet, um die Gebäude mit Wärme zu versorgen.

Die **Variante 4 „Dietenbach KliEn - Klimaneutral und energiewendefähig“** versorgt über ein Niedertemperatur-Nahwärmenetz den gesamten Stadtteil mit Wärme. In der Energiezentrale am Mundenhof befinden sich Großwärmepumpen und eine Elektrolyseanlage zur Herstellung von grünem Wasserstoff. Die Abwärme der Elektrolyse deckt rund 20 % des Wärmebedarfs. Der restliche Wärmebedarf wird über die Wärmepumpen gedeckt, die als Umweltwärme die Abwasser- und Grundwasserwärme nutzen. Der produzierte Wasserstoff soll in lokalem Zusammenhang für Anwendungen im Bereich Mobilität und Industrie in Freiburg Verwendung finden. Die Kombination aus emissionsfreier Abwärme, erneuerbarer Wärme und der Erzeugung grünen Wasserstoffs ermöglichen eine hohe Systemeffizienz sowie einen klimaneutralen und energiewendefähigen Betrieb des Energieversorgungssystems.

Die Gesamtbewertung der vier Versorgungsvarianten zeigt, dass das **Ziel der Klimaneutralität** über den Betrachtungszeitraum bis 2050 mit den beiden Varianten „Tiefengeothermie“ und „Dietenbach KliEn“ zu erreichen ist.

Die Wirtschaftlichkeitsberechnung verdeutlicht, dass die **Investitionskosten** im Stadtteil Dietenbach bei der Variante „Tiefengeothermie“ am niedrigsten sind. Diese liegen rund 40 – 50 Mio. € unter denen der Vergleichsvariante. Bei der Variante 4 „Dietenbach KliEn“ resultieren auf Gebäudeebene die niedrigsten Investitionskosten, da die Kosten für die Wärmeerzeugung im Wesentlichen durch die vorgelagerten Infrastrukturen entstehen.

Bei der Betrachtung der **Jahresgesamtkosten** resultieren für die beiden klimaneutralen Versorgungsvarianten „Tiefengeothermie“ und „Dietenbach KliEn“ die niedrigsten Jahresgesamtkosten. Die Wärmegestehungskosten der Varianten sind hierbei im Wesentlichen durch die Investitionskosten bestimmt und ermöglichen damit eine erhöhte Energiepreisstabilität. Eine Kurzübersicht der Bewertungskriterien ist in Tabelle 1 dargestellt. V5 entspricht hierbei einer Referenzvariante mit überwiegend fossiler Wärmeversorgung.

Tabelle 1: Kurzübersicht Bewertungskriterien

		V 1	V 2	V 3	V 4	V 5
		Eisspeicher/PVT	Kalte Nahwärme	Tiefengeothermie	KliEn mit H2	Fossil
Klimabilanz 2025 - 2050 *	tCO ₂ Äq.	29.622	19.671	-7.084	-22.371	133.671
Investitionskosten **	Mio. €	507	497	455	496	444
Jahresgesamtkosten	T€/a	71.328	70.658	70.153	70.049	69.745

* Negative Werte = Klimaneutral

** KG 400 + PV + Energieinfrastruktur

Umsetzungsempfehlung

Aus Gutachtersicht empfehlen wir die Variante „Dietenbach KliEn“ für die Umsetzung einer klimaneutralen Energieversorgung. Diese Variante hat die beste Klimabilanz bei vergleichbaren Jahresgesamtkosten und niedrigsten Investitionskosten auf Gebäudeebene. Besonders überzeugend ist dabei der zukunftsfähige Konzeptansatz, der durch die Erzeugung von grünem Wasserstoff einen Mehrwert für die Region Freiburg schaffen kann.

2 Aufgabenstellung und Vorgehensweise

2.1 Ziele und allgemeine Aufgabenbeschreibung

Vor dem Hintergrund einer stetig wachsenden Einwohnerzahl mit entsprechender Verknappung der Wohn- und Gewerbeflächen ist die Stadt Freiburg gefordert, dieser Situation mit einer städtebaulichen Entwicklungsmaßnahme zu begegnen. Dazu soll der neue Stadtteil Dietenbach entwickelt werden. Bei einer Brutto-Baufläche von ca. 100 ha soll zusätzlicher Wohnraum für ca. 16.000 Einwohner/innen bzw. ca. 6.900 WE entstehen. Klimaschutz ist in Freiburg ein zentrales Element der städtischen Politik. Die Stadt Freiburg hat mit zahlreichen Beispielen ihre Vorreiterrolle im Klimaschutz belegt und möchte auch in Zukunft Beispiele aufzeigen, wie der Weg zu einer klimaneutralen Kommune praktisch umgesetzt werden kann. Diese Bemühungen erfolgen vor dem Hintergrund des städtischen Klimaschutzkonzepts, bei dem der Gemeinderat zuletzt Anfang 2019 die Zielsetzungen für die kommenden Jahrzehnte aktualisiert und verschärft hat: Bis 2030 soll der Ausstoß der klimaschädlichen Emissionen um 60% gegenüber dem Referenzjahr 1992 reduziert werden. Angestrebt wird bis 2050 die vollständige Klimaneutralität.

In Anlehnung an die städtischen Klimaschutzziele und angesichts der Langfristigkeit des Vorhabens (ca. 2025 bis 2042 bzw. 2050) wird für das neue Quartier die Klimaneutralität angestrebt. Im Rahmen der Fortschreibung des Energiekonzepts soll daher ermittelt und dargestellt werden, mit welchen planerischen, baulichen, technischen und infrastrukturellen Maßnahmen das Ziel der Klimaneutralität erreicht werden kann.

2.2 Vorgehensweise

Im Mittelpunkt der Entwicklung des Energiekonzepts steht das übergeordnete Ziel der Klimaneutralität und damit die maximale Nutzung von erneuerbaren Energien zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen durch fossile Energieträgern.

Die Konzeptentwicklung gliedert sich in die folgenden Bearbeitungsschritte:

- Entwicklung der ökonomischen und energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen
- Bedarfsanalyse auf Basis des Rahmenplans (Zwischenstand Juni 2020)
- Potenzialanalyse lokal verfügbarer erneuerbarer Energiequellen
- Entwicklung von Versorgungsvarianten
- Bewertung der Varianten anhand ökologischer und ökonomischer Kriterien

Ökonomische und energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen

Investitionskosten und laufende Kosten (Instandsetzung, Wartung, Energie) werden über den Betrachtungszeitraum bis 2050 abgebildet. Dabei werden zwei Szenarien mit Steigerungsraten der Preisindizes entwickelt – ein „konservatives“ sowie ein „progressives“ Szenario.

Für die Entwicklung von Energiepreisen und Konversionsfaktoren für CO₂-Äquivalente werden ebenfalls jeweils zwei Szenarien „konservativ“ und „progressiv“ über den Betrachtungszeitraum bis 2050 entwickelt.

Bedarfsanalyse

Der städtebauliche Entwurf wird unter den Gesichtspunkten Energieeffizienz, Klimaschutz und Klimawandelanpassung bewertet. Des Weiteren wird der Energiebedarf der Gebäude für Heizung, Trinkwarmwasser, Kälte und Strom ermittelt. Im Mobilitätssektor wird die Binnen-Mobilität von motorisiertem Individualverkehr und dem ÖPNV (Straßenbahnlinie 5) bestimmt sowie der Strombedarf von Elektroladesäulen in den Quartiergaragen.

Potenzialanalyse

Im Rahmen der Potenzialanalyse zur Nutzung erneuerbarer Energien und Abwärme im lokalen Umfeld des neuen Stadtteils Dietenbach wurden verschiedene Energiequellen untersucht und bewertet. Neben dem großen solaren Potential auf Dächern und Fassaden der Gebäude (Photovoltaik) gibt es für die Wärmeversorgung und großes Potential an Abwasser- und Grundwasserwärme, das in mehreren Versorgungsvarianten eine tragende Rolle einnimmt.

Entwicklung Versorgungsvarianten

Insgesamt vier Versorgungsvarianten werden in dem Energiekonzept entwickelt und bewertet. Die Konzeptentwicklung beinhaltet dabei die technische Dimensionierung und Verortung der Energieversorgungssysteme als auch die Ermittlung der hierfür erforderlichen Kosten. Folgende Varianten sind dabei berücksichtigt:

- V1 – Dezentrale WP und Saisonalspeicherung mit Eisspeichern
- V2 – Dietenbach Plus
- V3 – Tiefengeothermie
- V4 – Dietenbach KliEn - Klimaneutral und energiewendedenlich

Für die vergleichende Darstellung der aufgelisteten Varianten wird zusätzlich eine konventionelle Versorgungsvariante V5 mit ausgewiesen, die zur Einordnung der Variantenergebnisse dienen soll.

Bewertung Versorgungsvarianten

Das übergeordnete Ziel der Klimaneutralität wird mit Hilfe einer Bilanz der Treibhausgasemissionen über den Zeitraum von 2025 bis 2050 bestimmt. Im Bilanzumfang ist sowohl der Gebäudebetrieb als auch der Nutzerstrom und der Mobilitätssektor enthalten. Die Grauen Emissionen von Bausubstanz und der technischen Installationen sind nicht enthalten.

Die Bilanzgrenze bildet die Gemarkung Dietenbach. Das Ziel für die Klimaneutralität ist eine Treibhausgasbilanz von ≤ 0 kgCO₂-Äquivalente/a. Dieses Ziel soll sowohl kumuliert über den Zeitraum von 2025-2050 als auch im (Ziel-)Jahr 2050 erreicht werden. Eine Übersicht dieser Zielgröße mit verwandten Bewertungssystemen z.B. der DGNB findet sich in Anhang 8.1.

Die wirtschaftliche Bewertung erfolgt als Vollkostenbetrachtung angelehnt an die Annuitätsmethode nach VDI Richtlinie 2067. Dabei werden die relevanten Bau- und Investitionskosten ermittelt. Auf Gebäudeebene sind dies die Kosten der Kostengruppen 300 und 400 sowie die Kosten für die zentrale Energieinfrastruktur im neuen Stadtquartier (ohne öffentliches Stromnetz).

Die vergleichende Darstellung der Jahresgesamtkosten ermöglicht die wirtschaftliche Bewertung über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes. In den Jahresgesamtkosten sind neben den Bau- und Investitionskosten auch die Wartungs- und Instandhaltungskosten, die Energiekosten aber auch Erlöse und Gutschriften durch Fördermittel berücksichtigt.

Der Betrachtungszeitraum für die Berechnung der Jahresgesamtkosten gemäß der VDI 2067 umfasst die Jahre 2020 bis 2050. Das Basis- und damit auch Bezugsjahr aller Berechnungen ist das Jahr 2020. Die Berechnung des Barwerts erfolgt mit einem Zinssatz von 0 % (Basis) und im Rahmen der Sensitivitätsanalyse mit 2 % und 4 %.

3 Rahmenbedingungen

3.1 Plan- und Flächengrundlage / zeitlicher Rahmen

Die dem Energiekonzept zugrundeliegenden Plan- und Flächendaten entsprechen dem Rahmenplan mit Zwischenstand Juni 2020. Der Stadtteil wird in sechs Bauabschnitten (Abbildung 1) entwickelt, wobei die einzelnen Bauabschnitte planmäßig nach der folgenden zeitlichen Bauabfolge erschlossen und fertiggestellt bzw. bezogen werden sollen:

	Erschließung	Fertigstellung und Bezug
BA 1	2025	2026
BA 2	2027	2028
BA 3	2029	2030
BA 4	2031	2032
BA 5	2033	2034
BA 6	2037	2039

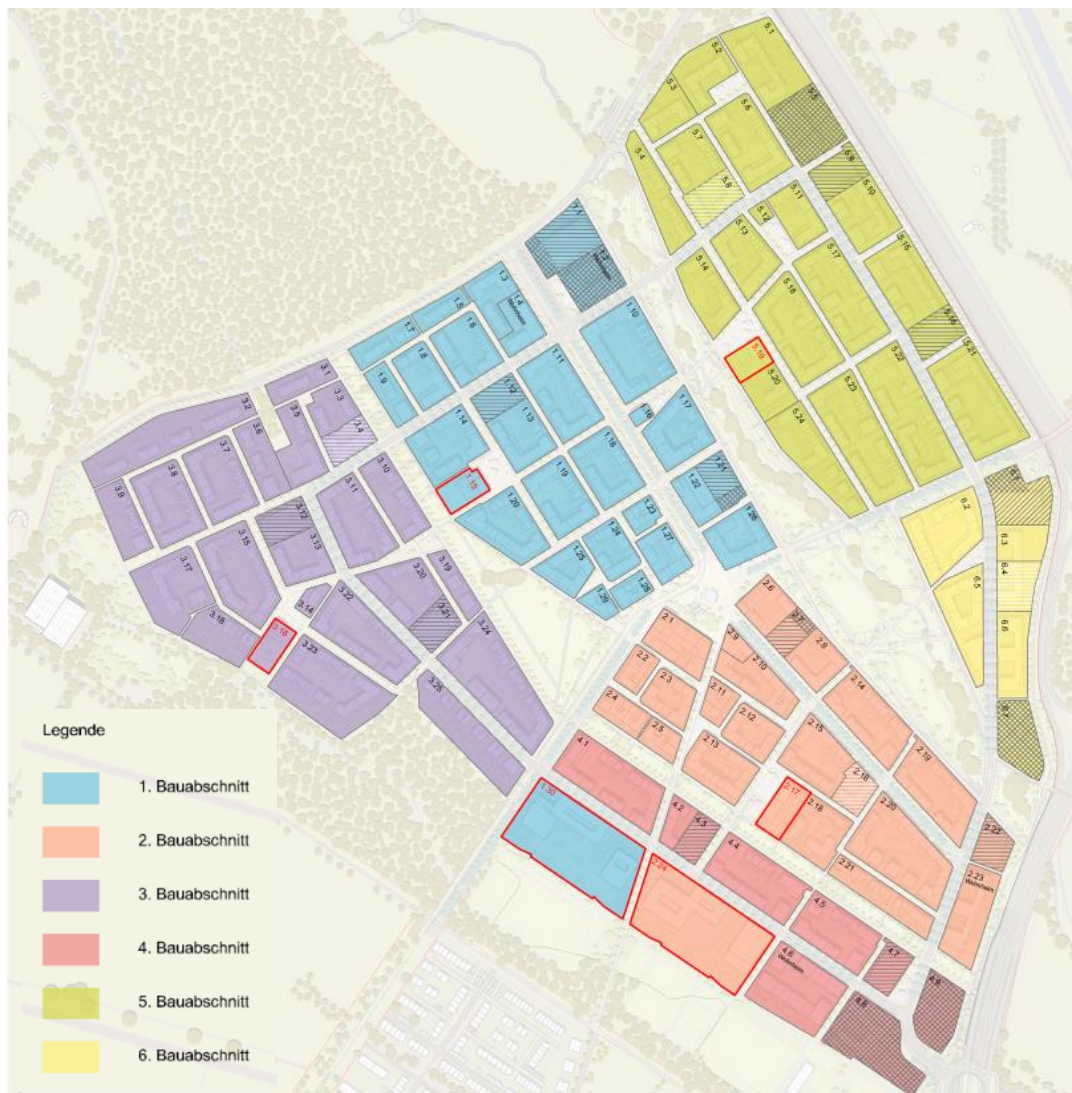


Abbildung 1: Bauabschnitte (BA1-6) – Quelle: Entwurf Rahmenplan PGD

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Verteilung der Bruttogeschossflächen über Bauabschnitte und Nutzungsformen. In Anhang 8.2 befindet sich hierzu eine detaillierte tabellarische Auflistung. Die gesamte Bruttogeschossfläche liegt bei rd. 1.100.000 m². Mit 75% Wohnnutzung bietet der Stadtteil Wohnraum für rd. 6.900 Wohneinheiten und damit Lebensraum für rd. 16.000 Bewohner.

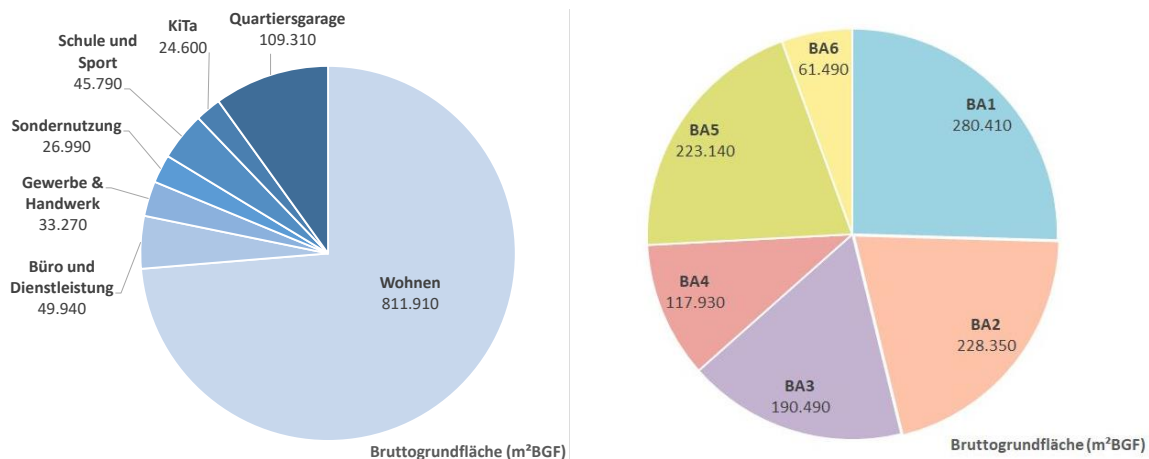


Abbildung 2: Flächen nach Nutzungsformen und Bauabschnitten – Quelle: Eigene Darstellung

Im Rahmen des Energiekonzepts werden **vier Ausbaustufen** angenommen, um die Entwicklung der Energiebedarfe und den Ausbau der Energieinfrastruktur für die nachfolgende Treibhausgasbilanzierung und Vollkostenberechnung bis 2050 vornehmen zu können.

Wesentliche energetische und technologische Größen, die von Stufe zu Stufe zunehmen, sind u.a. Gebäudeenergiebedarfe und gebäudegebundene Photovoltaikerträge, die Anzahl an Elektroladesäulen bzw. Strombedarfe für E-Fahrzeuge, der Wärmenetzausbau bzw. Netzverluste sowie der Ausbau der Lärmschutzwand-Photovoltaik. Der modulare Ansatz aller Konzeptvarianten berücksichtigt dabei auch den sukzessiven Ausbau der Erzeugungsanlagen in der Energiezentrale innerhalb der vier Ausbaustufen.

- Stufe 1: 2026-2029 | BA 1 - 25 % BGF
- Stufe 2: 2029-2033 | BA 1-3 - 63 % BGF
- Stufe 3: 2033-2039 | BA 1-5 - 94 % BGF
- Stufe 4: 2039-2050 | BA 1-6 - 100 % BGF

3.2 Bauliche Strukturen und Städtebau

Der städtebauliche Entwurf wurde unter den Gesichtspunkten Energieeffizienz, Klimaschutz und Klimawandelanpassung bewertet. Die ausführliche Bewertungsmatrix befindet sich in Dateianlage 1.

3.3 Ökonomische Rahmenbedingungen

Die Investitionskosten werden über den Betrachtungszeitraum mit Referenzjahr 2020 und Meilensteinen in den Jahren 2030, 2040 und 2050 abgebildet. Dabei werden zwei Szenarien mit Steigerungsraten der Preisindizes betrachtet:

Steigerungsrate „konservativ/ moderat“ – Eine auf Sicherheit bedachte Annahme, die einer Fortschreibung der bisherigen historischen Entwicklung entspricht (Preisveränderung der letzten 20 Jahre).

Steigerungsrate „progressiv“ – Eine progressive Steigerungsrate die einer stärkeren Änderung (+/-) als der konservativen Preisentwicklung entspricht.

Der Entwicklung der beiden Szenarien liegt die folgende Methodik zu Grunde.

1. Analyse historischer Werte einzelner Produktionsfaktoren im Baugewerbe
2. Zusammenfassung einzelner Produktionsfaktoren (oder Kostengruppen)
3. Inflationsbereinigung der Preisindizes
4. Fortschreibung von Preisindizes (konservativ und progressiv)

Eine detaillierte Beschreibung der ökonomischen Rahmenbedingungen befindet sich in Dateianlage 2.

3.4 Energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen

Für die Entwicklung von Energiepreisen und Konversionsfaktoren für CO₂-Äquivalente wurden jeweils zwei Szenarien über den Betrachtungszeitraum entwickelt, mit Referenz 2020 und Meilensteinen 2030, 2040 und 2050.

Veränderung der Konversionsfaktoren für CO₂-Äquivalente durch einen wachsenden Anteil erneuerbarer Energien in der deutschen Energieinfrastruktur:

Szenario „konservativ/ moderat“ – Ausbau Erneuerbaren Energien (EE) wie bisher

Szenario „progressiv“ – Verstärkter Ausbau EE zur Erreichung der nationalen Klimaschutzziele

Entwicklung von Energiepreisszenarien für relevante Energieträger und –formen sowie Entwicklung von Vergütung und Erlösen durch Energievermarktung im Quartier

Szenario „konservativ/ moderat“ – Moderate Preisentwicklung

Szenario „progressiv“ – sich stärker verändernde Energiepreise

Zur Entwicklung der Szenarien wurden jeweils zwei Szenarien aus bundesweit aktuell vorliegenden Studien ausgewählt. Bei den Energiepreisszenarien folgte eine Anpassung der Verbraucherpreise an Freiburger Verhältnisse.

Details zu den energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen befinden sich in Dateianlage 3.

4 Energiebedarfsermittlung und Potentialanalyse

4.1 Energiebedarf Gebäude

Für die unterschiedlichen Nutzungsformen der Gebäude wurden „Dämmstandards“ definiert, denen jeweils ein flächenbezogener Heizwärmebedarf zugeordnet werden kann:

- Wohnungsbau: Freiburger Effizienzhaus 55
- Büro und Dienstleistung: Effizienzgebäude 55
- Gewerbe & Handwerk: Effizienzgebäude 55
- Sondernutzung: Effizienzgebäude 55
- Schule und Sport: Passivhaus
- KiTa: Passivhaus

Neben Heizwärme- und Trinkwarmwasserbedarfen werden Kältebedarfe sowie Allgemein- und Nutzerstrombedarfe abgebildet. In Anhang 8.3 sind alle verwendeten flächenbezogenen Energiebedarfe tabellarisch dargestellt. Mit Ausnahme des Kältebedarfs für „Wohnen“ werden die spezifischen Energiebedarfswerte (Anhang 8.3) auf die gesamte Fläche einer Nutzungsform (siehe Anhang 8.2) angerechnet. Der spezifische Kältebedarf „Wohnen“ wird nur bei 33% der Gebäude angerechnet bzw. versorgt, die verbleibenden 67% der Wohngebäude werden nicht mit Kälte versorgt.

Der Gesamtwärmebedarf liegt bei rund 51 GWh/a, wovon 67 % für Heizwärme und 33 % für Trinkwarmwasser benötigt werden. Der Kältebedarf liegt bei rund 2 GWh/a. Der Strombedarf beträgt 32 GWh/a, wovon 20 % für Allg.-Strom der Gebäude und 80 % für Nutzerstrom benötigt werden. Neben Abbildung 3 ist eine detaillierte tabellarische Auflistung der absoluten Energiebedarfe nach Nutzungsformen in Anhang 8.4 dokumentiert.

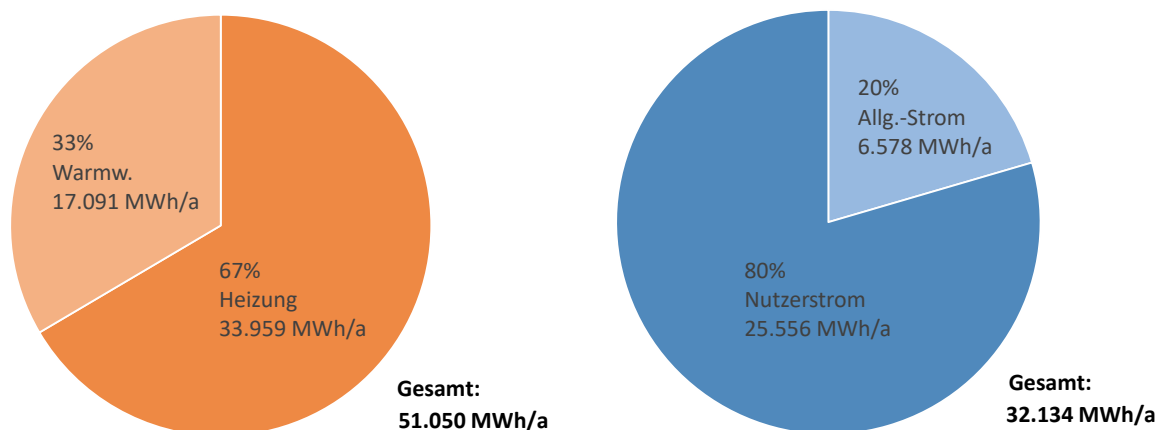


Abbildung 3: Wärme- und Strombedarf Gesamt (Erzeugernutzenergie)

4.2 Energiebedarf Mobilität

Der berücksichtigte Energiebedarf für Mobilität gliedert sich in drei Bereiche:

1. Motorisierter Individualverkehr (MIV) - Binnenmobilität innerhalb Stadtteil
2. Binnen-ÖPNV Stadtbahn - Linie 5 innerhalb Stadtteil
3. Batterieelektrischer MIV - Ladesäulen Quartiergaragen

Motorisierter Individualverkehr (MIV) - Binnenmobilität innerhalb Stadtteil

Der MIV wird mit Ausnahme der batterieelektrischen Fahrzeuge (rein elektrisch und Plug-In Hybrid) als reine Binnenmobilität abgebildet. Es werden also nur Wegstrecken innerhalb des Stadtteils Dietenbach berücksichtigt und in die Treibhausgasbilanz mitaufgenommen. Die Basis hierfür bilden die täglichen MIV-Personenwege aus dem Verkehrsmodell des zuständigen Verkehrsplaners „Stete-Planung“. Mit Hilfe einer mittleren PKW-Besetzung und einer mittleren Wegstrecke innerhalb dem Stadtteil wird damit die MIV Fahrleistung und die damit verbundenen Energieverbräuche und Treibhausgas-Emissionen bestimmt. Details hierzu sind in Dateianlage 4 dokumentiert.

Binnen-ÖPNV Stadtbahn - Linie 5 innerhalb Stadtteil Dietenbach

Die Stadtbahnlinie 5 mit aktueller Endstation Rieselfeld wird in Richtung dem neuen Stadtteil Dietenbach erweitert. Die innerhalb des Stadtteils zurückgelegte Fahrtstrecke beträgt in eine Richtung rund 1 km. Grundlage für die Bestimmung des Energiebedarfs dieser Binnen-ÖPNV-Mobilität bildet der aktuelle Fahrplan der Linie 5 gemäß VAG Stand 12/2020 mit jährlich 48.700 Fahrten. Dies entspricht einer jährlichen Binnen-Verkehrsleistung von $97 \cdot 10^3$ km/a, woraus sich ein jährlicher Energiebedarf zwischen 450 – 480 MWh/a ergibt, je nach Betrachtungsjahr. Details hierzu sind in Dateianlage 4 dokumentiert.

Batterieelektrischer MIV - Ladesäulen Quartiergaragen

Basis für die Berechnung des Energiebedarfs für batterieelektrischen MIV (rein elektrisch und Plug-In Hybrid) bilden die Angaben zu Stellplätzen aus dem Erläuterungsbericht zum Rahmenplan¹. Es wird angenommen, dass nur Stellplätze innerhalb der Quartiersgaragen über Elektro-Ladesäulen verfügen. Hierbei wird ein Stellplatzschlüssel von 0,5 Stellplätzen pro Wohneinheit berücksichtigt, woraus sich rund 3.000 Stellplätze für den Bereich Wohnen ergeben. Zusätzlich werden 80 Stellplätze für Wohnheime und 360 Stellplätze als Besucherparkplätze angenommen (60 % von 600 Stellplätzen innerhalb von Quartiersgaragen). Daraus ergibt sich eine Gesamtanzahl von Stellplätzen innerhalb Quartiergaragen von rund 3.450 in Ausbauphase 4 (BA1-6). Die Durchdringung mit Ladesäulen wird gemäß der Studie Freiburg 2050 (Öko-Institut, 2011) in den vier Ausbauphasen (Vgl. Kapitel 3.1) wie folgt angenommen (Vergleich Dateianlage 4):

¹ Erläuterungsbericht zum Rahmenplan - Anlage 2 zur Drucksache G-20/094, Stadt Freiburg, November 2020, Seiten 97,98

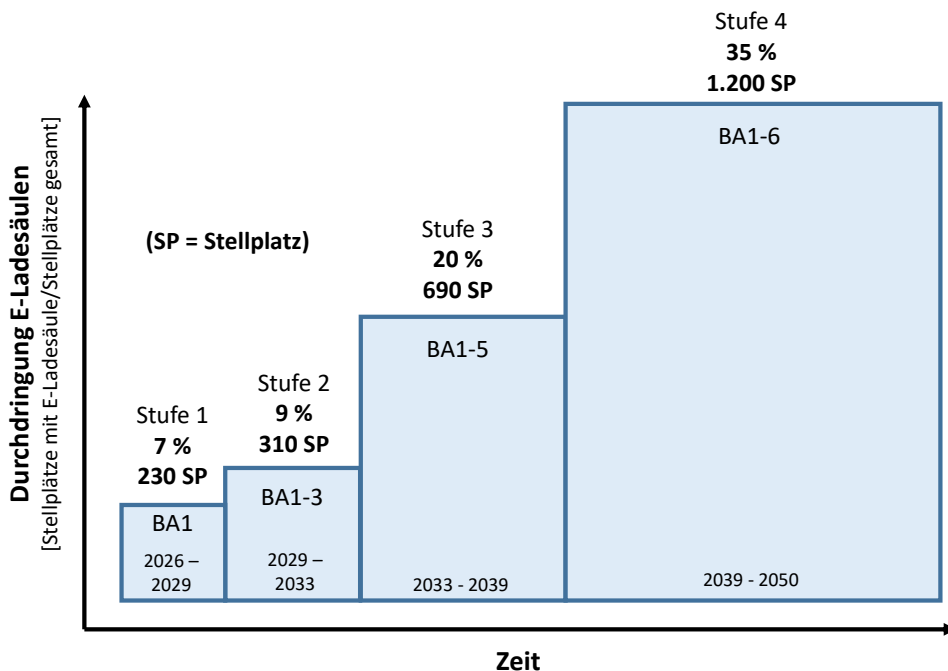


Abbildung 4: Durchdringung E-Ladesäulen in Quartiergaragen – Quelle: Eigene Darstellung

Eine Ladesäule verfügt über 11 kW Ladeleistung. Es wird angenommen, dass 50 % der Fahrleistung in den Quartiergaragen beladen wird, die weiteren 50 % werden außerhalb von Dietenbach beladen. Mit einem typischen spezifischen Energiebedarf von rund 15 kWh/100km ergibt sich ein Energiebedarf von rund 1.400 kWh pro Stellplatz/Ladesäule und Jahr. Dies entspricht einer Fahrleistung von rd. 50 km/d. Der Gesamtstrombedarf für batterieelektrischen MIV liegt damit bei 1,7 GWh/a in Ausbaustufe 4 (BA1-6).

4.3 Potentialanalyse

Im Rahmen der Potenzialanalyse zur Nutzung erneuerbarer Energien und Abwärme im lokalen Umfeld des neuen Stadtteils Dietenbach wurden folgende Quellen untersucht und bewertet:

- Abwasserwärme
- Abwärme (aus z.B. Industrie)
- Grundwasserwärme
- Oberflächennahe Geothermie
- Solarenergie
- Windkraft

Für die Erreichung der Klimaneutralität ist eine Versorgung nahezu ohne fossile Energieträger erforderlich. Im Zuge der Potenzialanalyse beschränkt sich daher die vertiefende Untersuchung auf die Energiequellen, die einen signifikanten Beitrag für die Energieversorgung von Dietenbach leisten können. Wesentliches Potential an lokalen erneuerbaren Energien bilden dabei Solarenergie, Grundwasserwärme und Abwasserwärme. Diese werden im Folgenden näher beschrieben.

4.3.1 Nutzung von Solarenergie mit Photovoltaik

Die Nutzung von Solarenergie mittels Photovoltaik (PV) ist für das Ziel der Klimaneutralität elementar! Photovoltaiksysteme auf Dach- und Fassadenflächen bilden einen Grundpfeiler sämtlicher Versorgungsvarianten. Des Weiteren kann die Lärmschutzwand entlang dem östlichen Stadtteilrand mit PV ausgestattet werden. Zur Ermittlung des gebäudeintegrierten PV-Potentials fand ein intensiver Austausch mit Stadtplanern und Architekten statt.

Für eine bestmögliche Ausnutzung von Dachflächen für PV-Systeme eignen sich vor allem Flachdächer mit Doppelreihenbelegung und Pultdächer mit flächiger Belegung. Diese beiden Systemlösungen werden im Energiekonzept auf den vorhandenen Dachflächen von insgesamt 260.000 m² angesetzt (Anteile siehe Abbildung 5). Damit ergibt sich eine Photovoltaik-Gesamtleistung auf den Gebäudedächern von 36,5 MW_p. Zusätzlich werden 30 % der geeigneten Süd-, Ost-, und West-Fassadenflächen ab dem zweiten Obergeschoss mit fassadenintegrierter PV ausgestattet. Damit ergibt sich zusätzlich eine Leistung von 5,4 MW_p an Fassaden und damit eine gesamte PV-Leistung von rd. 42 MW_p mit einem Gesamtertrag von rd. 38 GWh/a. Zusätzlich wird die rund 1,5 km lange Lärmschutzwand mit einer PV-Anlage ausgestattet. Dabei liefern 2 m² PV-Modulfläche pro laufenden Meter Lärmschutzwand (3 m Höhe) eine Gesamtleistung von 0,6 MW_p mit einem Gesamtertrag von 400 MWh/a. Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht das Photovoltaik Potential.

		Modulfläche	Leistung	Ertrag
Pultdach		103.000 m ²	21 MW	20,7 GWh/a
	<i>80 % Dachflächen- belegung</i>			
Flachdach		78.000 m ²	15,5 MW	14,7 GWh/a
	<i>60 % Dachflächen- belegung</i>			
Fassade		28.000 m ²	5,4 MW	2,8 GWh/a
	<i>30 % geeigneter Außenfassaden (ab 2.OG, nicht Nord)</i>			

Abbildung 5: Photovoltaik-Potential gebäudeintegriert – Quelle: Eigene Darstellung

4.3.2 Grundwasserwärme

Die Ermittlung des Potentials an Grundwasserwärmen erfolgt durch eine Folge von Gutachten des KIT Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW) auf Basis eines Grundwassermodells mittels der Software FEFLOW®. Wesentliche Randbedingungen des zu ermittelnden Potentials sind dabei die Durchlässigkeit des Grundwasserleiters (siehe Anhang 8.5) und seine Ergiebigkeit. Bewertungsgrundlage sind Grundwassereinwirkungen bei der Entnahme und der äquivalenten Injektion von Grundwasser in Form von Grundwasserspiegel- und Temperaturänderungen (sog. Temperaturfahnen). Die Bewertung der Machbarkeit unter Prüfung der Grundwassereinwirkungen erfolgt durch das Umweltschutzamt und weitere Projektbeteiligte Freiburger Stadtämter und Behörden.

Das KIT AGW hat im April 2020 ein erstes Grundwasserwärmenutzungs-Gutachten für Dietenbach fertiggestellt, mit grundlegenden Szenarien. Im Zuge der Bearbeitung des Energiekonzepts durch EGS-plan wurden weitere Simulationen durch das KIT-AGW im Dezember 2020 fertiggestellt, bei denen der detailliert ermittelte Energiebedarf (vgl. Kapitel 4.1) sowie die zu erwartende Effizienz der Wärmepumpen zu Grunde gelegt wurde. Im Vorfeld hierzu wurden im Auftrag des Umweltschutzamts Ergiebigkeits-Pumpversuche vor Ort durchgeführt, mit deren Hilfe die Aussagekraft des Grundwassermodells stark verbessert wurde (vgl. Anhang 8.5). Des Weiteren wurde die zeitliche Auflösung der Simulation erhöht. Beim nun verwendeten reduzierten Grundwasser-Entzugsprofil wird bereits die Vorzugsvariante 4 zu Grunde gelegt, bei der die Wärmedeckung vorrangig durch die Abwärme der Elektrolyse stattfindet und bei den Wärmepumpen vorrangig Abwasserwärme als Wärmequelle genutzt wird. Details hierzu siehe Kapitel 5.6 bzw. Abbildung 14.

Wesentliches Ergebnis des Gutachtens ist, dass große Teile des Stadtteils mit Hilfe von Wärmepumpen auf Basis von Grundwasserwärme als Wärmequelle realisiert werden können (Potenzial: > 80 % Deckungsanteil Wärme). Grundwasser dient sowohl in Versorgungsvariante 2 als auch in Variante 4 als wesentliche Wärmequelle zur Versorgung des Stadtgebiets Dietenbach.

Die folgende Abbildung zeigt das aktuell favorisierte Szenario hinsichtlich Lokation und Anzahl Grundwasserbrunnen. Die Brunnen haben einen Bohrdurchmesser von 1.200 mm und einen Filterdurchmesser von 600mm. Der Tiefe der Brunnen liegt bei rd. 10 m ab GOK².

² GOK = Geländeoberkante

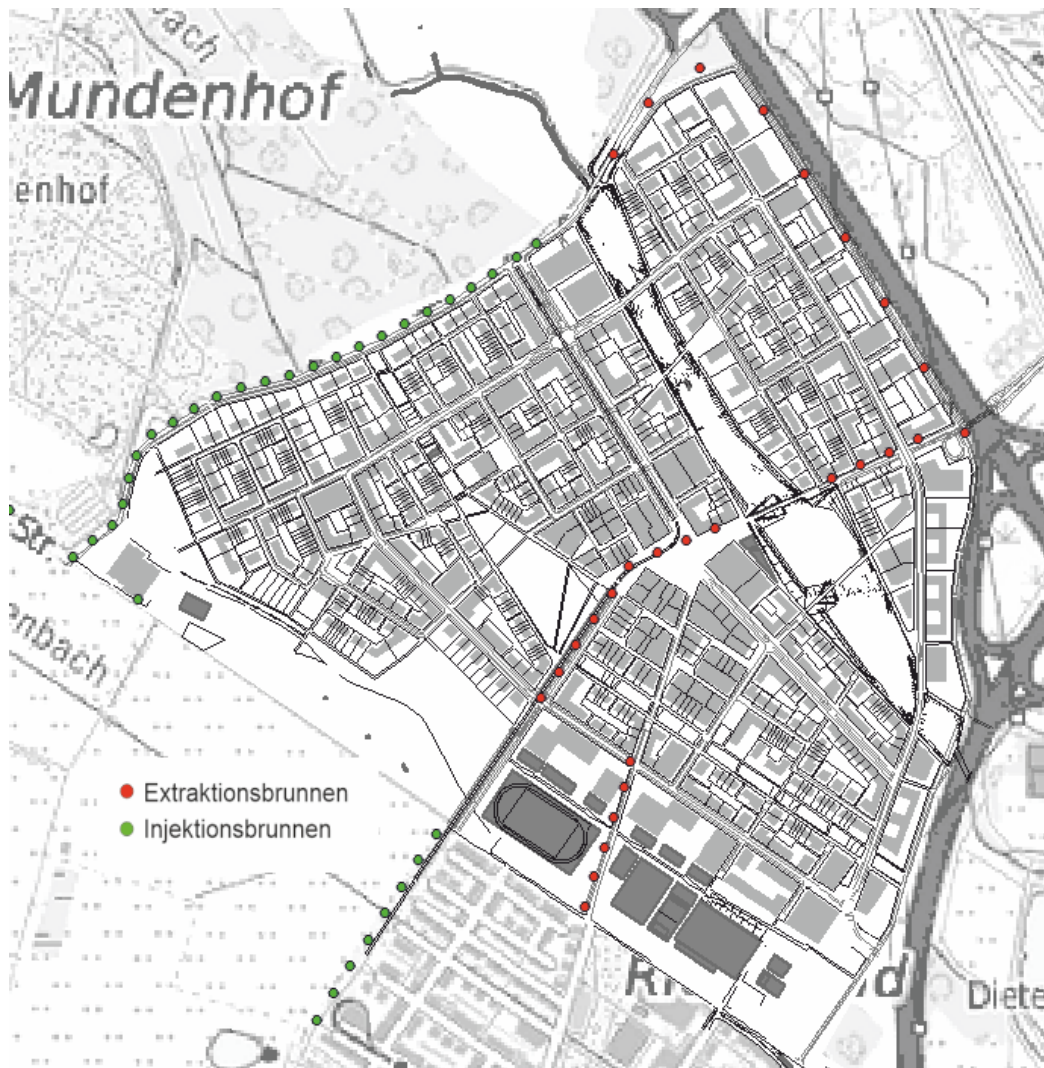


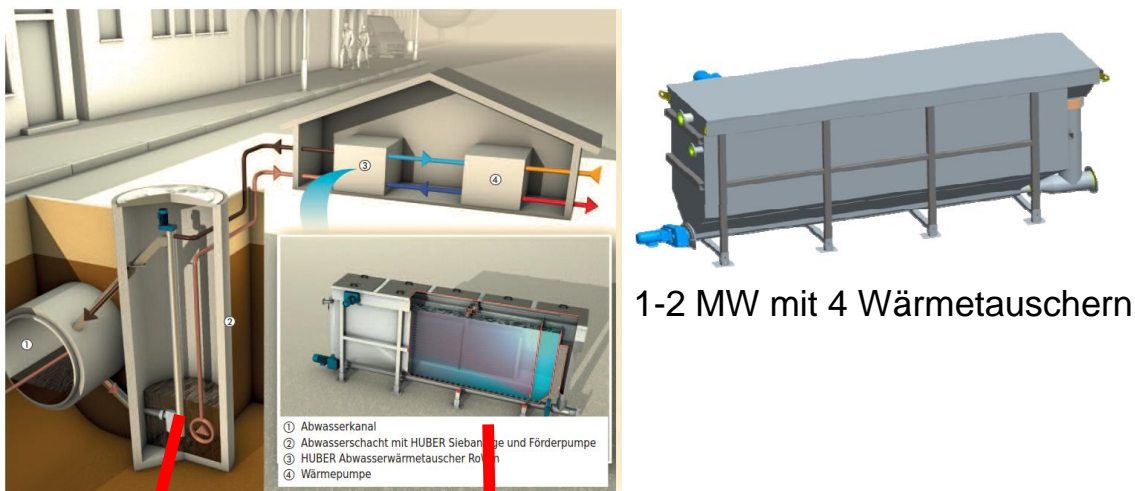
Abbildung 6: Favorisiertes Szenario hinsichtlich Lokation/Anzahl Grundwasserbrunnen (rot = Entnahmebrunnen, grün = Schluckbrunnen) – Quelle: KIT AGW Gutachten III Variante 8

Die Lokation der Brunnen wie sie hier dargestellt ist, wurde in einem interdisziplinären iterativen Prozess mit allen Projektbeteiligten entwickelt. Randbedingung ist insbesondere die Unterbringung der Brunnen und Sammelleitungen im Stadtgebiet im Rahmen der KLP (Koordinierte Leitungsplanung) auch unter Berücksichtigung der zeitlichen Entwicklung der sechs Bauabschnitte und des Erdaushublagers (im Bereich BA 5/6). Eine weitere wichtige Randbedingung ist die Entlastung des geplanten Versickerungsbeckens am nördlichen Rand des Stadtgebietes – hier werden nur minimale Grundwasser-Aufhöhungen toleriert. Aus diesem Grund wurde die Entnahmegalerie (rote Punkte in Abbildung 6) bis zum Versickerungsbecken verlängert und Schluckbrunnen in diesem Bereich vermieden.

4.3.3 Abwasserwärme

Die Ermittlung des Potentials an Abwasserwärme erfolgt durch ein Gutachten der Firmen Klinger & Partner GmbH/ Ryser Ingenieure (CH) im Auftrag des Umweltschutzamts Freiburg. Das Gutachten analysiert das Abwasserwärmepotential aus dem zur Mundenhofer Straße parallel verlaufenden Abwassersammler mit einem Durchmesser von rd. 2 m und einer mittleren täglichen Durchflussmenge von 360 l/s.

Im Gutachten werden zwei verschiedene Systemlösungen untersucht. Beide basieren auf einem Bypass-System, um technische Einbauten im Abwassersammler zu vermeiden. Aufgrund der geringeren Investitionskosten und dem reduzierten Flächenbedarf für die Anlagentechnik zur Abwasserwärme-Auskopplung wird eine Systemlösung auf Basis eines externen Rohrbündelwärmetauschers der Firma Huber SE empfohlen (Abbildung 7). Das im April 2021 ermittelte Potential entspricht einer Entzugsleistung von 2 MW. Damit stehen zur Wärmedeckung aus Abwasser je nach Effizienz der Wärmepumpe 2,7 - 3 MW zur Verfügung.³



Entnahme von Energie aus Abwasser mit dem HUBER ThermWin®-Verfahren

Entnahmestelle Abwasser

- unterirdische Schachtsiebanlage unmittelbar am Kanal (h=7,5 m und $\varnothing = 3,2$ m)
- zur Vorreinigung Abwasser

Externes Bauwerk mit Wärmetauscher (AWT)

- im UG eines Gebäudes oder separates Bauwerk (ober- oder unterirdisch)
- Bei 2 MW Leistung 200 m² Platzbedarf mit LRH = 4 m (4 WT, 1- 2 Steuerungs-Schaltschränke)

Abbildung 7: Systemlösung Firma Huber SE, Abwasserwärmetauscher und Abwasser-Entnahmebauwerk – Quelle: Huber SE

³ In den Ergebnissen des Energiekonzepts ist das Abwasserpotenzial mit einer Entzugsleistung von 1 MW berücksichtigt. Zum Zeitpunkt der Simulationen war dieses moderate Potenzial zunächst absehbar und abgestimmt.

5 Versorgungs- und Energiekonzept

5.1 Grundlagen der Variantenbetrachtung

Im Energiekonzept werden vier Versorgungsvarianten entwickelt und mit Hilfe der Quartier-Software „QuaSi“ modelliert und simuliert. Neben den Varianten V1-V4 zur Erreichung der Klimaneutralität dient eine konventionelle Versorgungsvariante als Vergleichsmaßstab, um die energetischen, ökologischen und ökonomischen Bewertungskriterien einordnen zu können. Zwischen den einzelnen Varianten variiert lediglich das Versorgungssystem. Die gemeinsame Basis bilden vor allem die folgenden Größen:

- Gebäudeenergiestandard (Kapitel 4.1)
- Energiebedarfe für Heizung, Trinkwarmwasser sowie Allgemein- und Nutzerstrom (Kapitel 4.1)
- Energiebedarfe für Binnenmobilität und Elektroladesäulen (Kapitel 4.2)
- Photovoltaiksysteme an den Gebäuden sowie an der Lärmschutzwand (Kapitel 4.3)
- Ausbau in vier zeitdiskreten Ausbauszenarien – vgl. Kapitel 3.1

5.2 Übersicht der Versorgungsvarianten

Variante V1 – Dezentrale Wärmepumpen und Saisonalspeicherung mit Eisspeichern

- Versorgungskonzept gemäß Siegerentwurf des städtebaulichen Wettbewerbs
- Zentrales kaltes Nahwärmenetz mit Regeneration durch Abwasserwärme zur Versorgung eines Teilbereiches von Dietenbach und dezentrale Wärmepumpen zur Wärmeerzeugung, Eisspeicher in den Quartiersgaragen
- Restlicher Stadtteil durch dezentrale kalte Nahwärmenetze mit Regeneration durch PVT und Eisspeichern

Variante V2 – Dietenbach Plus

- Dezentrale Wärmepumpen zur Wärmeerzeugung auf Baufeldebene
- Zentrales kaltes Nahwärmenetz mit Regeneration durch Abwasserwärme und Grundwasser
- Energiezentrale in der Nähe des Mundenhofs

Variante V3 – Tiefengeothermie

- Zentrale Wärmeversorgung über Nahwärmenetz mit Wärme aus Tiefengeothermie-Anlage außerhalb des Gebietes Dietenbach

Variante V4 – Dietenbach KliEn

- Zentrales Niedertemperaturnetz für die Wärmeversorgung im Quartier
- Energiezentrale in der Nähe des Mundenhofs
- Zentrale Wärmepumpen in Energiezentrale für Wärmeerzeugung aus Abwasserwärme und Grundwasser sowie Nutzung von Elektrolyse-Abwärme
- Erzeugung und Nutzung von grünem Wasserstoff im Bereich Mobilität und Industrie in Freiburg → Mehrwert über den neuen Stadtteil hinaus!

5.3 V1 – Dezentrale Wärmepumpen und Eisspeicher

Die Variante 1 bildet das vom Siegerentwurf des städtebaulichen Wettbewerbs vorgeschlagene Energiekonzept ab (Abbildung 8). Die Wärme- und Kälteversorgung basiert auf dezentralen Wärmepumpen lokalisiert innerhalb der Baufelder. Hierzu erhält jedes Baufeld eine Heizzentrale zur Versorgung eines oder mehrerer Gebäude auf dem Baufeld. In der Heizzentrale ist jeweils die Wärmepumpe sowie weitere Komponenten wie Pufferspeicher und Hydraulik untergebracht. Die Größe der Heizzentrale und der Komponenten variiert je nach Baufeldgröße bzw. versorgter Nutzfläche und Nutzungsformen im Baufeld. In Anhang 8.6 ist beispielhaft der Aufbau und Platzbedarf einer Heizzentrale innerhalb eines Baufeldes zur Versorgung von 75 Wohneinheiten skizziert (reale planerische Umsetzung in vergleichbarem Projekt von EGS-plan).

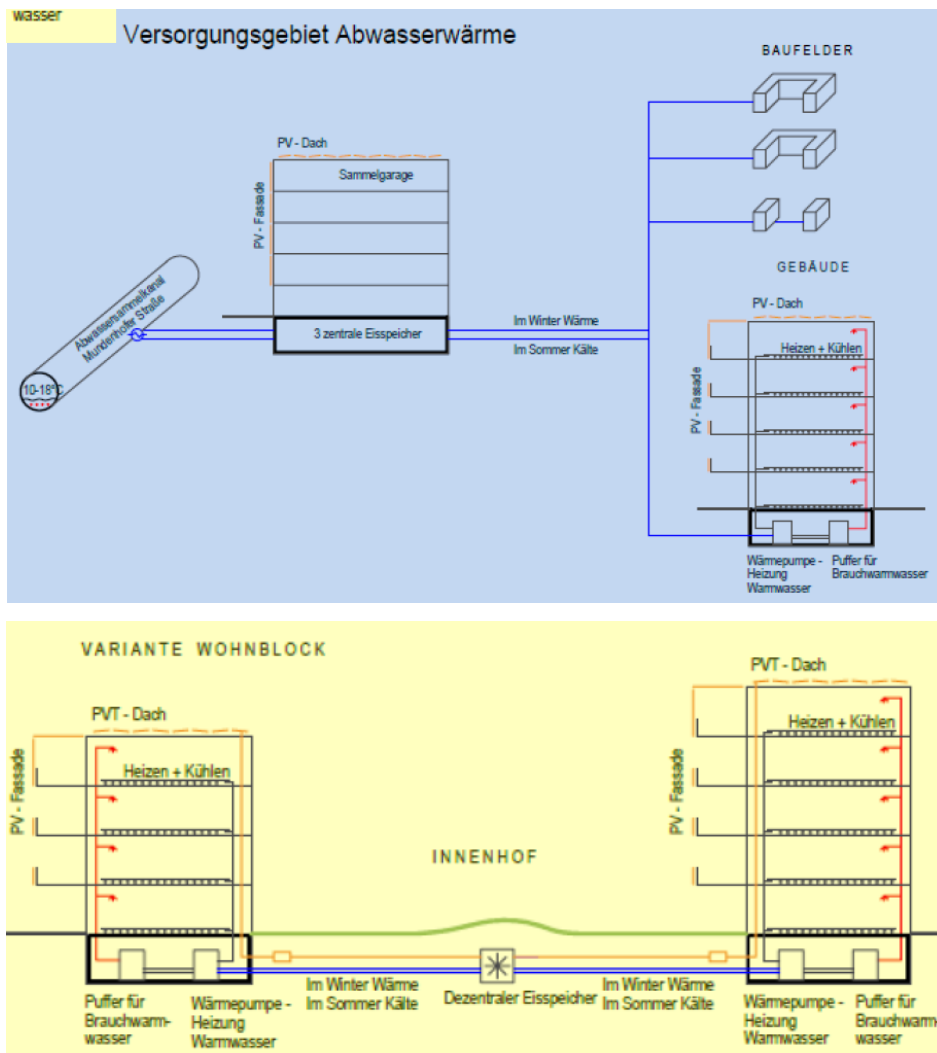


Bild: endura kommunal, Stahl + Weiß

Abbildung 8: Energiekonzept Siegerentwurf städtebaulicher Wettbewerb – Quelle: Siegerentwurf Städtebaulicher Wettbewerb

Ein zentrales kaltes Nahwärmenetz mit Regeneration durch Abwasserwärme versorgt in Kombination mit zentralen Eisspeichern in den Quartiersgaragen die dezentralen Wärmepumpen im Versorgungsgebiet 1 - Bauabschnitt 3 (Abbildung 9).

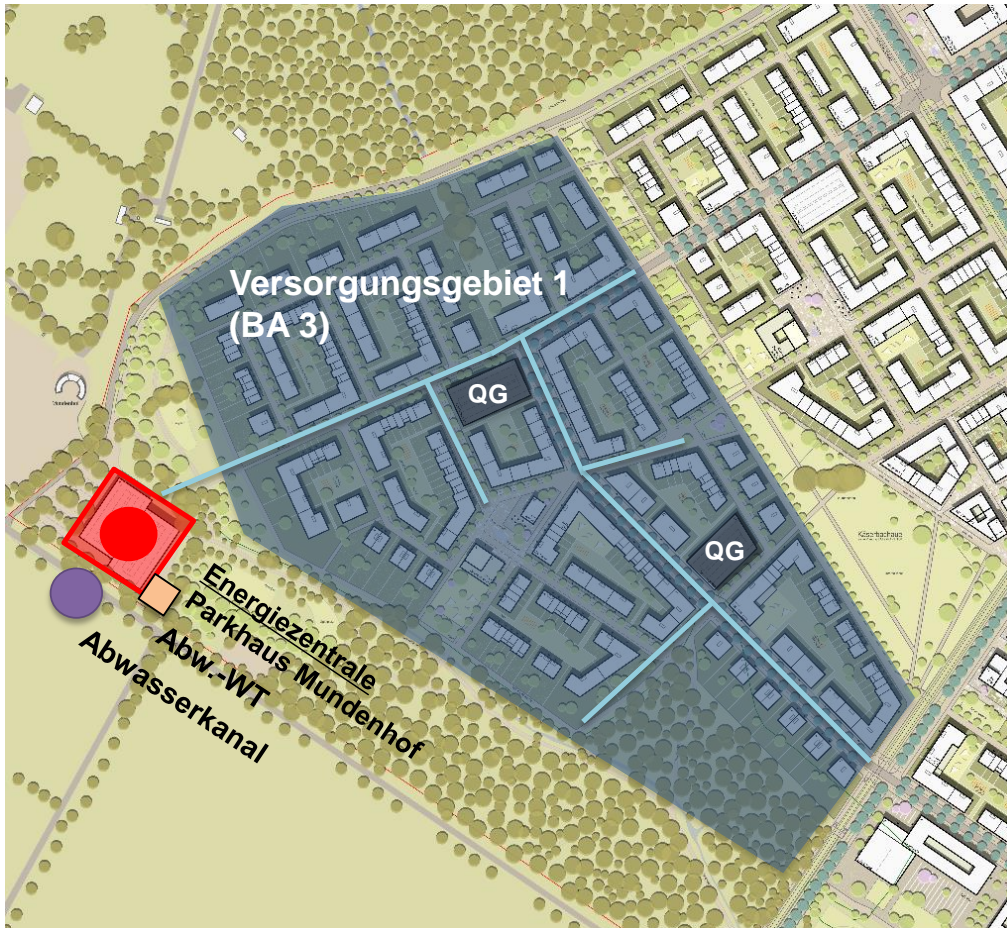


Abbildung 9: Variante 1 – Versorgungsgebiet 1 Kalte Nahwärme und Regeneration mit Abwasserwärme – Quelle: Eigene Darstellung

In der dargestellten Energiezentrale für Versorgungsgebiet 1 sind Abwasserwärmetauscher mit einer Gesamtleistung von 1 MW und die Infrastruktur zum Betrieb des kalten Nahwärmenetzes insbesondere Hydraulik, Netzpumpen, Druckhaltung und MSR-Technik untergebracht. Zur Erschließung der Abwasserwärme wird am Abwassersammler an der Mundenhoferstraße ein Entnahmebauwerk errichtet (vgl. Kapitel 4.3.3 System Huber SE).

Die Wärmepumpen im restlichen Stadtteil (ohne BA 3) werden mit Hilfe von dezentralen kalten Nahwärmenetzen mit Regeneration durch PVT-Kollektoren (Kombination aus Photovoltaik und thermischer Solarnutzung) und dezentralen Eisspeichern auf Baufeldebene versorgt. Eisspeicher ermöglichen hierbei eine saisonale Verschiebung von im Sommer überschüssiger Solarenergie in die Heizperiode in den Wintermonaten. Die Kältebereitstellung kann in dieser Variante zum Teil hocheffizient über freie Kühlung mit Hilfe der Eisspeicher erfolgen.

Der hohe Platzbedarf der zentralen und dezentralen Eisspeicher innerhalb der Baufelder ist ein Nachteil dieser Variante. Es werden Eisspeicher mit bis zu 1.500 m³ Volumen benötigt, je nach Wärmebedarf des Baufeldes. In Anhang 8.7 ist der prozentuale Flächenbedarf der Eisspeicher bezogen auf die jeweilige Baufeldfläche von bis zu 19 % dargestellt.

Die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpen und damit die Effizienz ist aufgrund der niedrigen Quelltemperatur der Eisspeicher begrenzt. Die Wärmeversorgung innerhalb der Baufelder findet mit lokalen Wärmenetzen statt – besteht ein Baufeld aus mehreren solitären Gebäuden werden diese über erdverlegte Leitungen erschlossen. Innerhalb der Heizzentrale eines Baufeldes sind Sole-Zwischenkreise erforderlich.

In Anhang 8.8 ist das Energieflussbild zu dieser Variante dargestellt. Es verdeutlicht die Energieströme des Versorgungskonzepts.

5.4 V2 – Dietenbach Plus

Die Variante 2 „Dietenbach Plus“ basiert auf einem kalten Nahwärmenetz, das das gesamte Stadtquartier erschließt. Analog zu Variante 1 befinden sich innerhalb der Baufelder dezentrale Wärmepumpen, die das jeweilige Baufeld mit Wärme und Kälte versorgen. Am Mundenhof wird eine Energiezentrale untergebracht, in der das kalte Nahwärmenetz betrieben und mit Abwasser- und Grundwasserwärme regeneriert wird.

Die Abwasserwärmenutzung ist mit einer Entzugsleistung von 1 MW hinterlegt. Der restliche quellseitige Wärmebedarf wird vollständig durch Grundwasserwärme versorgt. Hierzu wird jeweils eine Galerie aus Förderbrunnen und Schluckbrunnen verwendet. Sämtliches Grundwasser aus der Förderbrunnengalerie wird über eine Sammelleitung der Energiezentrale zugeführt. Dort wird mit Hilfe von Grundwasser-Wärmetauschern dem Grundwasser Wärme mit bis zu 5 Kelvin Temperaturdifferenz entzogen. Das so abgekühlte Grundwasser wird mit Hilfe einer Verteilleitung auf die Schluckbrunnengalerie verteilt, wo das Grundwasser wieder in den Grundwasserleiter eingebracht wird. In Abbildung 10 wird die Versorgungsinfrastruktur verdeutlicht.

In der Energiezentrale am Mundenhof mit insgesamt rd. 400 m² Grundfläche sind analog zu Variante 1 vier externe Abwasserwärmetauscher untergebracht. Des Weiteren sind die notwendigen Grundwasser-Wärmetauscher, Hydraulik und Pufferspeicher sowie Netzpumpen und weitere Systeme zum Betrieb der kalten Nahwärme enthalten.

In dieser Variante wird die Abwasserwärme als Grundlast verwendet und deckt rd. 25 % des Jahres-Wärmequellenbedarfs der Wärmepumpen. Der restliche Bedarf wird vollständig aus dem Grundwasser entzogen. Auf jedem Baufeld wird eine Heizzentrale installiert, die mit einer Wärmepumpe das Baufeld mit Wärme und Kälte versorgt. Die Wärmepumpen innerhalb der Baufelder nutzen die kalte Nahwärme als Wärmequelle und produzieren, zu großen Teilen mit baufeldeigenem PV-Strom, Nutzwärme für Heizung und Trinkwarmwasserbereitung.

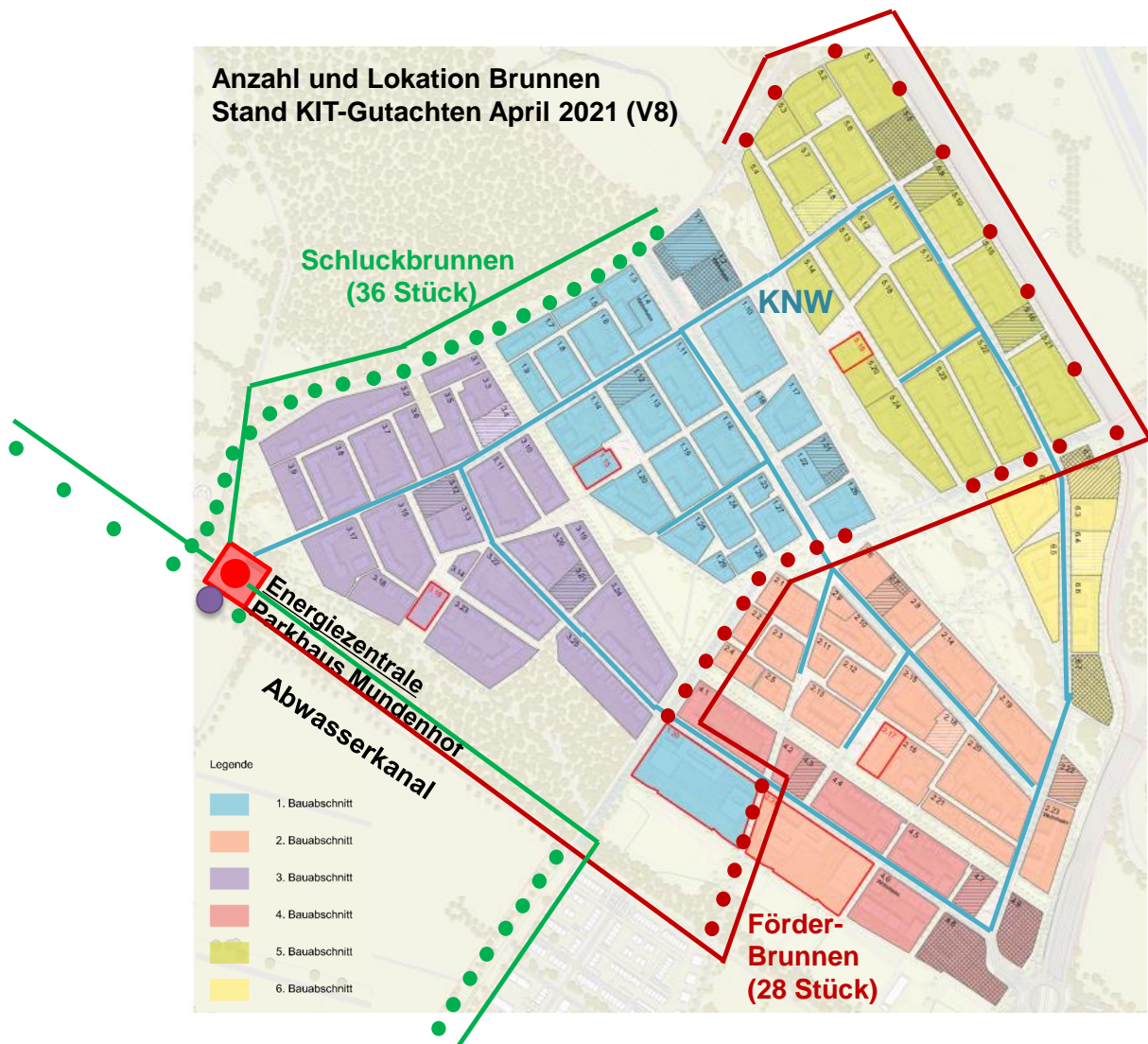


Abbildung 10: Variante 2 – Zentrale Infrastruktur – Quelle: Eigene Darstellung

Die Kältebereitstellung kann in dieser Variante hocheffizient über freie Kühlung mit Hilfe der kalten Nahwärme erfolgen.

Im Anhang ist das synoptische Anlagenschema (Anhang 8.9) und das Energieflussbild (Anhang 8.10) zu dieser Variante dargestellt. Es verdeutlicht die Energieströme des Versorgungskonzepts.

5.5 V3 – Fernwärme Tiefengeothermie

In dieser Variante stammt die gesamte Wärme für den Stadtteil Dietenbach aus einem Fernwärmenetz, das Wärme aus einem möglichen Tiefen-Geothermiekraftwerk westlich von Freiburg bezieht. Für die Wärmeverteilung der Gebäude im Stadtteil wird hierfür ein Nahwärmenetz betrieben. Innerhalb der Baufelder werden Übergabestationen verwendet, um die Gebäude mit Wärme zu versorgen. Die Kältebereitstellung wird mit Hilfe dezentraler Kompressionskältemaschinen sichergestellt. Es wird keine weitere zentrale Infrastruktur benötigt.

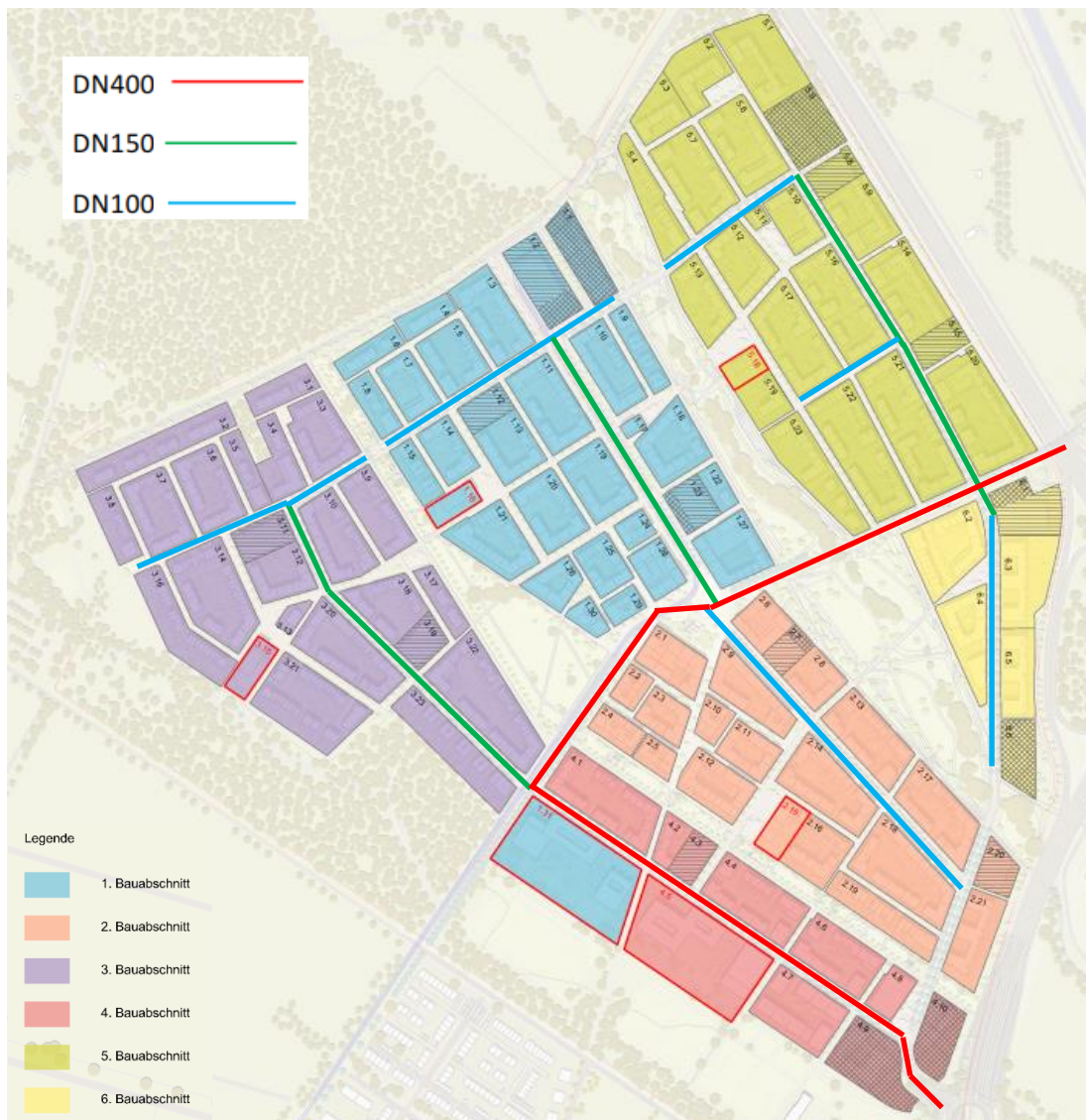


Abbildung 11: Variante 3 – Fernwärme Tiefengeothermie – Quelle: Eigene Darstellung

In Anhang 8.11 ist das Energieflussbild zu dieser Variante dargestellt. Es verdeutlicht die Energieströme des Versorgungskonzepts.

5.6 V4 – Dietenbach KliEn - Klimaneutral und energiewendenedienlich

Variante 4 basiert auf einem Niedertemperatur-Nahwärmenetz zur Wärmeversorgung des gesamten Stadtteils. In einer Energiezentrale am Mundenhof befindet sich ein zentrales Wärmepumpensystem und eine Elektrolyseanlage zur Herstellung von grünem Wasserstoff. Die Abwärme der Elektrolyse deckt rund 20 % des Wärmebedarfs. Der restliche Wärmebedarf wird mittels zentraler Wärmepumpen auf Basis von Abwasser- und Grundwasserwärme als Umweltwärmequellen gedeckt.

Die Elektrolyse besteht aus zwei modularen 5 MW Einheiten in Container-Bauweise (10 MW Gesamtleistung) in Außenaufstellung. Alle weiteren zentralen Systeme werden innerhalb der Hochgarage Mundenhof oder alternativ in einer solitären Energiezentrale untergebracht. Gemäß Energiekonzept sind dies insbesondere:

- 10 Wärmepumpen mit einer Leistung von jeweils 2 MW (Gesamtleistung 20 MW)
- 10 Plattenwärmetauscher zum Entzug von Grundwasserwärme mit jeweils rd. 1,3 MW
- 4 Abwasserwärmetauscher mit insgesamt 1 MW Entzugsleistung (Potenzial bis 2 MW)
- Netzpumpen, Druckhaltung und Hydraulik
- MSR-Technik (Schaltschränke)
- Separater Raum für Elektroschaltanlagen mit Frequenzumrichtern für die Wärmepumpen und Trafos sowie der Niederspannungshauptverteilung

Des Weiteren wird in Außenaufstellung ein Pufferspeicher mit rund 150 m³ Wasservolumen benötigt. Die folgende Abbildung gibt einen Überblick hierzu und beziffert den Grundflächenbedarf der zentralen Infrastruktur am Mundenhof.

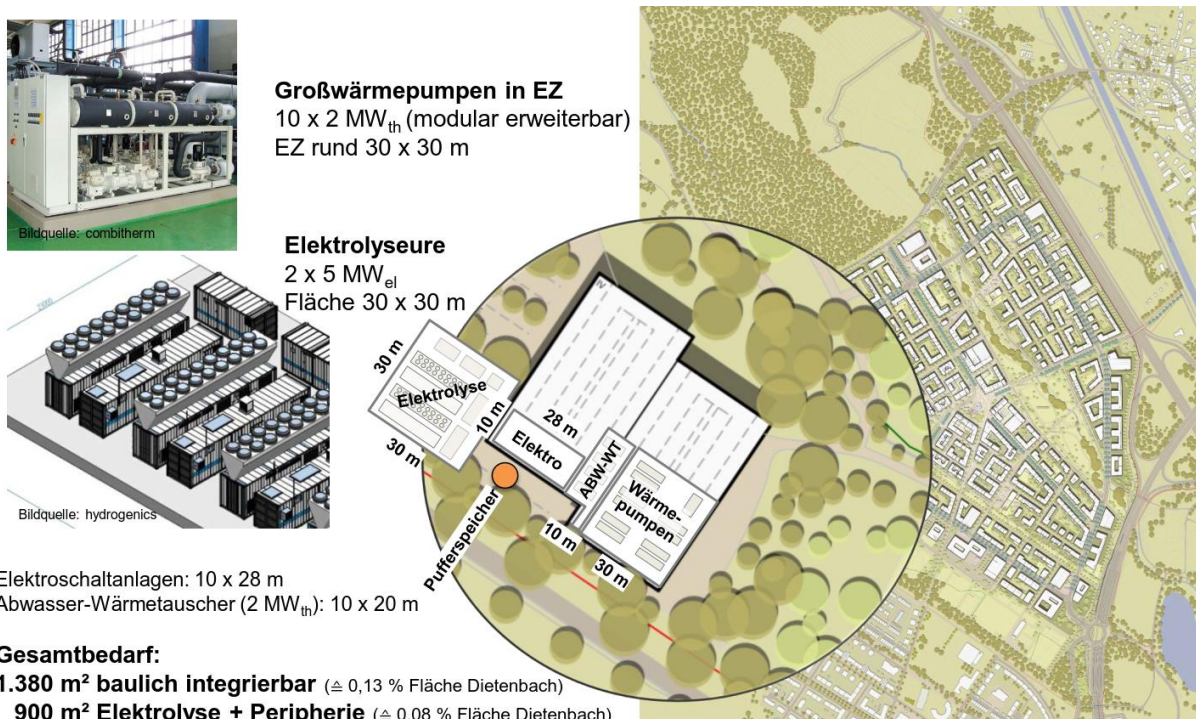


Abbildung 12: Variante 4 Energiezentrale

Die Erschließung der Abwasserwärme erfolgt analog zu Variante 1 und 2. Siehe hierzu auch Kapitel 4.3.3. Die Erschließung des Grundwassers erfolgt analog zu Variante 2 mit Hilfe von Brunnengalerien im Stadtgebiet (vgl. Kapitel 5.4). Die folgende Abbildung gibt eine Übersicht über die zentrale Infrastruktur.

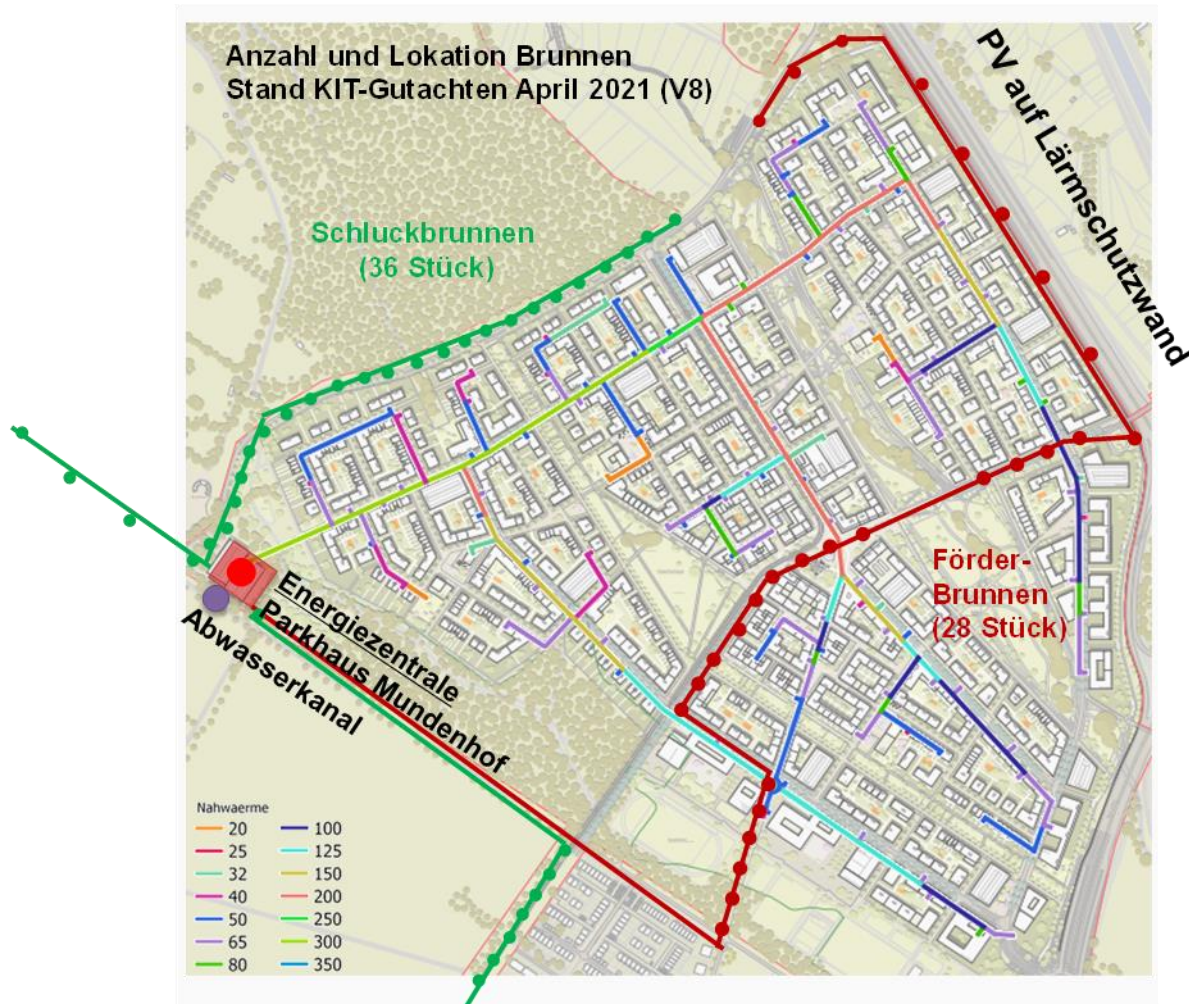


Abbildung 13: Variante 4 Technische Infrastruktur – Quelle: Eigene Darstellung

Die Auswirkungen auf den Grundwasserleiter dieser Versorgungsvariante wurden durch das KIT-AGW (vgl. Kapitel 4.3.2) gesondert untersucht. Die folgende Abbildung zeigt die maximal auftretenden Grundwasseraufhöhungen und -absenkungen, die in Zeiten des größten Wärmebedarfs des Stadtteils auftreten.

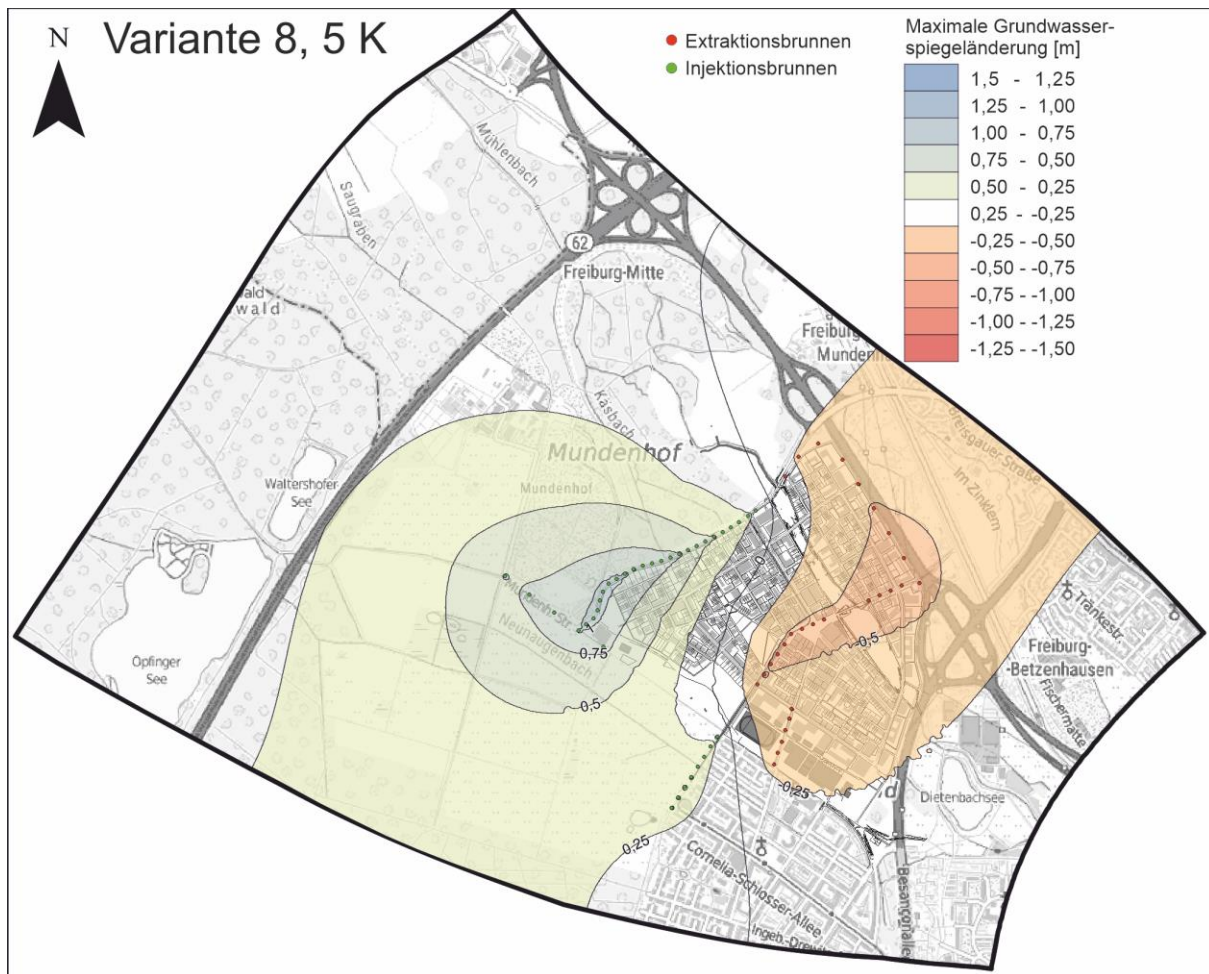


Abbildung 14: Variante 4 Ergebnisse Grundwassersimulation KIT-AGW – Quelle: KIT-AGW April 2021 Variante 8

Die Elektrolyse dient der Umwandlung von erneuerbarem Strom in grünen Wasserstoff. Hierfür werden Überschüsse aus lokalem Photovoltaikstrom der Energiezentrale als auch erneuerbarer Strom aus dem Stromnetz bezogen und in grünen Wasserstoff umgewandelt. Als grünen Wasserstoff bezeichnet man Wasserstoff der vollständig aus erneuerbarem Strom gewonnen wurde. Bei rund 4.500 Vollbenutzungsstunden und einer systemdienlichen Betriebsweise erzeugt der Elektrolyseur rund 24.000 MWh grünen Wasserstoff pro Jahr (\varnothing 2 t/d, ca. 700 - 800 t/a). Der so produzierte Wasserstoff steht für eine Nutzung im Bereich der Mobilität und Industrie zur Verfügung. Die Abwärme bei der Herstellung des Wasserstoffs wird für die Wärmeversorgung von Dietenbach verwendet und führt zu einer signifikanten Effizienzsteigerung des Prozesses.

Der gasförmige Wasserstoff kann nach der Elektrolyse-Anlage über eine H₂-Leitung zu potenziellen Kunden gebracht oder an eine Abfüllstation in Trailer geladen werden. Die Trailer können dann über kurze Entfernungen den Wasserstoff zu den Kunden im kommunalen und regionalen Umfeld transportieren (Industrie, Speditionen, H₂-Tankstellen). Alternativ kann der grüne Wasserstoff auch in das Erdgasnetz eingespeist werden und trägt dazu bei, dass das Gas aus dem Gasnetz grüner wird. Die Anlage 5 enthält eine Darstellung aktuell diskutierter Standorte für eine mögliche Abfüllstation.

Für die Elektrolyse wird ein Genehmigungsverfahren nach BImSchG erforderlich, bei dem die Auswirkungen auf die Umwelt und Betriebsrisiken geprüft werden. Für städtebauliche Projekte mit Elektrolyse, wie in der Neuen Weststadt in Esslingen (www.neue-weststadt.de), liegen die Genehmigungsbescheide vor und die Umsetzbarkeit ist demonstriert.

Exkurs Wasserstofferzeugung

Zur Erreichung der internationalen Klimaschutzziele ist eine konsequente Transformation unseres Energiesystems erforderlich. Wissenschaftlicher Konsens besteht darin, dass die Substitution fossiler Brennstoffe in allen Verbrauchssektoren erfolgen muss. Grüner Wasserstoff bildet dabei ein Schlüsselement, um erneuerbare Energie aus Wind und Sonne für andere Sektoren (Mobilität, Industrie) speicherbar und nutzbar zu machen. Neben dem Import von Wasserstoff wird die heimische Produktion von grünem Wasserstoff zur Deckung der zukünftigen Bedarfe eine wichtige Rolle spielen. Deutschland steht daher aktuell vor der Aufgabe geeignete Standorte für die Wasserstoffherstellung zu identifizieren. Besonderes Augenmerk ist dabei auf eine effiziente Energienutzung bei der Herstellung von Wasserstoff zu legen. Das perspektivische Abwärmepotenzial der Wasserstoffherstellung in Deutschland entspricht dem heutigen Fernwärmeaufkommen. Elektrolyse-Standorte, die eine Nähe zu Wasserstoffkunden (leitungsgebunden) als auch die Möglichkeit zur Abwärmenutzung aufweisen, sind unter dem Gesichtspunkt „Efficiency First“ zu priorisieren. Dietenbach bietet dabei das große Potenzial, über das neue Niedertemperatur-Versorgungssystem für den Stadtteil die anfallende Abwärme nahezu komplett zu nutzen.

Wasserstoff wird zukünftig in der Stadt und Region Freiburg eine immer stärkere Rolle im Energiesystem spielen. So bekunden Betriebe wie beispielsweise die VAG, ASF oder privatwirtschaftliche Unternehmen wie die Spedition Gschwander großes Interesse an grünem Wasserstoff, der vor Ort erzeugt, eine hohe lokale Wertschöpfung ermöglicht. Dezentrale Erzeugungsanlagen haben dabei den Vorteil, dass der Wasserstoff nicht über weite Strecken mit Diesel-LKW's transportiert werden muss. Beim Projekt Dietenbach kann z.B. über eine H₂-Leitung eine Versorgung von potenziellen Kunden in räumlicher Nähe erfolgen.

Im Anhang ist das synoptische Anlagenschema (Anhang 8.12) und das Energieflussbild (Anhang 8.13) zu dieser Variante Dietenbach KliEn dargestellt.

6 Variantenvergleich und Bewertung

Für die Bewertung der Ergebnisse dient ein Variantenvergleich auf Basis der Endenergie, der Treibhausgasemissionen, der Wirtschaftlichkeitsberechnung und weiteren Kriterien. Im Folgenden sind die Ergebnisse der vier Varianten aus dem Energiekonzept erläutert und ergänzt, um eine konventionelle Vergleichsvariante⁴, die helfen soll, die Resultate einordnen zu können.

6.1 Endenergiebilanz

Die Basis für die Bewertung der Treibhausgasemissionen und der Wirtschaftlichkeit der einzelnen Varianten bildet die Endenergiebilanz. Darin enthalten sind alle Endenergiebedarfe und Energieerzeugungsmengen im Stadtteil Dietenbach. Abbildung 15 zeigt die Netto-Bilanz der Varianten als Säulenpaare. Die linke Säule bildet den Endenergiebedarf ab und die rechte Säule die Gutschriften durch die lokale Energieerzeugung und Energienutzbarmachung. Die auf einer Jahresbilanz basierende Netto-Bilanz (Rot hervorgehoben) berechnet sich aus dem Bedarf abzüglich der Gutschrift. Der Strombedarf beinhaltet hier sowohl den Strombedarf der Wärmepumpen und den Nutzerstrom der Gebäude.

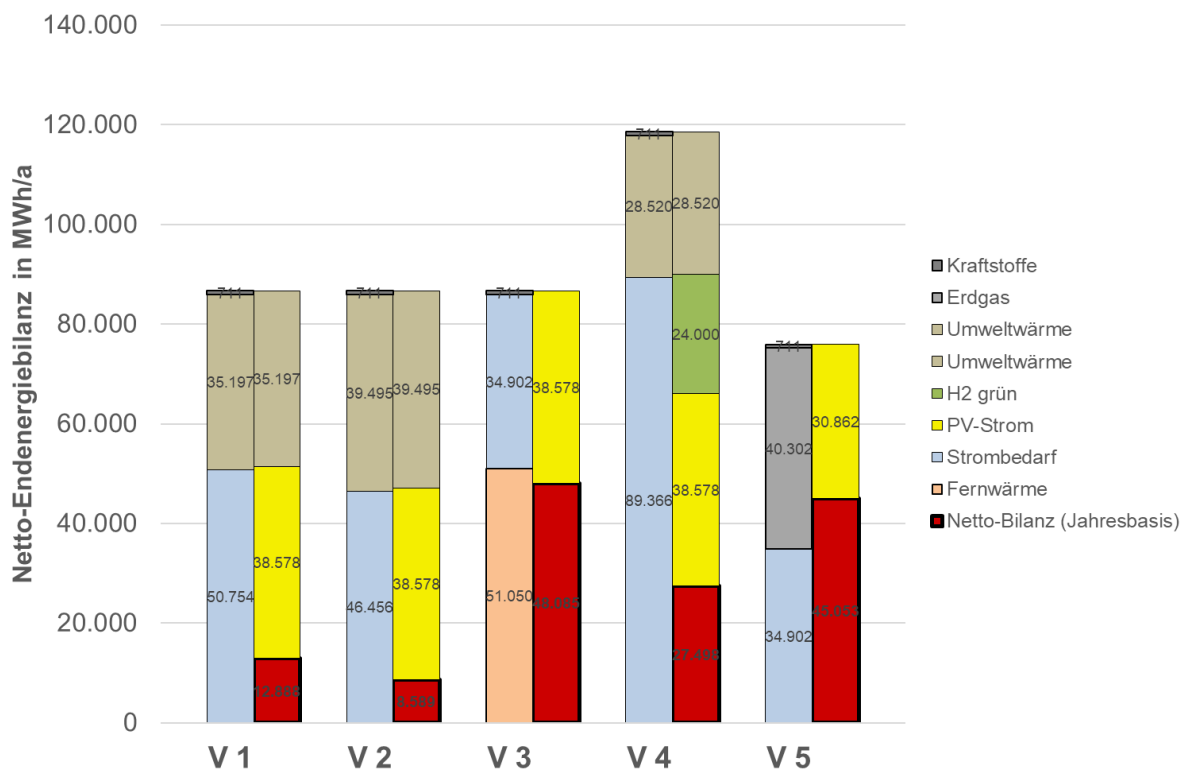


Abbildung 15: Endenergiebilanz 2050

⁴ Konventionelle Vergleichsvariante: Dämmstandard wie V1-4; Wärmeversorgung 80 % Erdgas und 20 % Solarthermie (nicht klimaneutral), 80 % des PV-Ertrags von V1-4

6.2 Klimabilanz

Die Klimabilanz⁵ basiert auf der Endenergiebilanz und berücksichtigt alle Emissionen durch die Energieversorgung im Quartier (CO₂-Äquivalente inkl. Vorketten für Energienutzung im Quartier – Gebäudebetrieb, Nutzerstrom und Binnenmobilität).

Die Abbildung 16 zeigt, dass die Varianten 3 und 4 im Jahr 2050 das Ziel der Klimaneutralität erreichen können (Szenario „progressiv“; Klimaneutralität = Negative Netto-Emissionen). Die Varianten 1 und 2 weisen zwar niedrige CO₂-Werte auf, die Klimaneutralität wird jedoch nicht erreicht. Zudem verdeutlicht die Darstellung die grundsätzliche ökologisch hochwertige Qualität der Versorgungsvarianten 1 bis 4 bezogen auf die konventionelle Vergleichsvariante 5, die um ein Vielfaches höhere Emissionen aufweist.

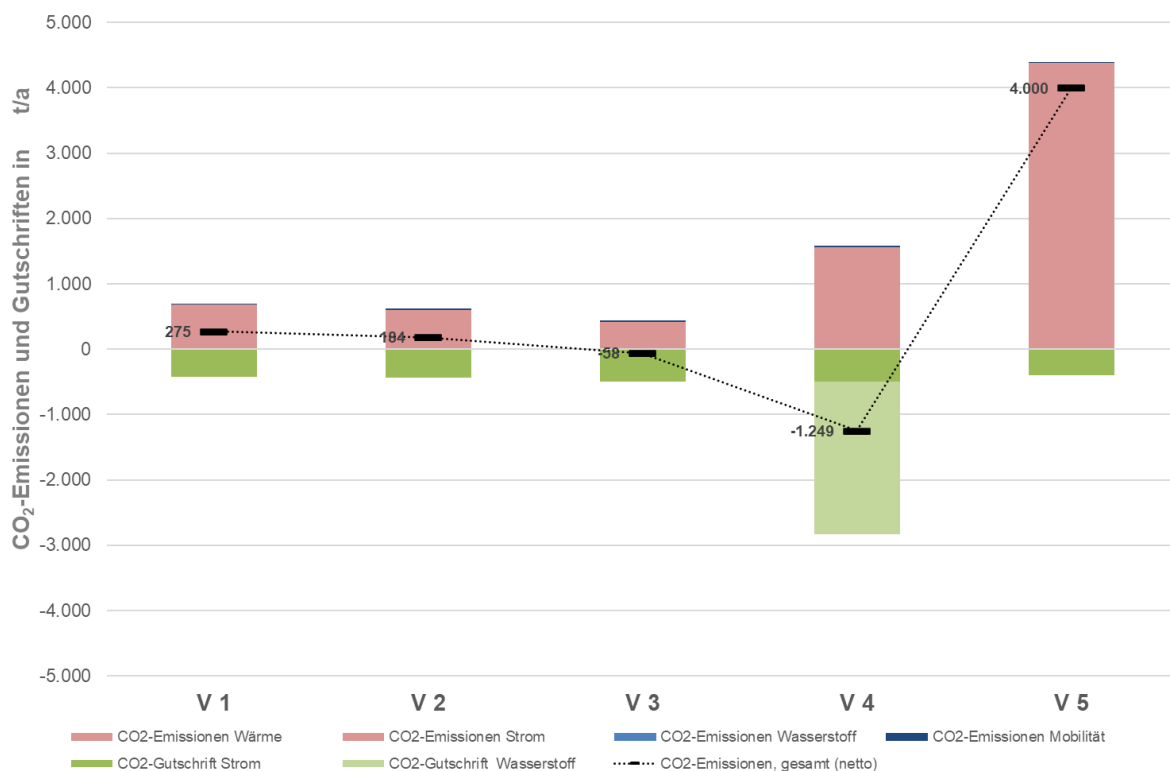


Abbildung 16: Klimabilanz 2050 (Szenario progressiv)

In Abbildung 17 sind die kumulierten Emissionen über den Betrachtungszeitraum bis 2050 dargestellt, um sich ändernde, externe Einflüsse, durch z.B. zunehmend erneuerbaren Strom aus dem öffentlichen Netz, bewerten zu können.

Lediglich die Varianten 3 „Tiefengeothermie“ und 4 „Dietenbach KliEn“ erreichen über den gesamten Erschließungs- und Betrachtungszeitraum eine negative Klimabilanz

⁵ Bilanz der Treibhausgasemissionen = Emissionen durch Energienutzung abzüglich der Gutschriften durch Energieexporte und der damit verbundenen Substitution von Energieträgern

(Klimaneutralität), bei der die Gutschriften die Emissionen übertreffen. Die Variante 3 „Tiefengeothermie“ erreicht dies im Wesentlichen durch die Gutschriften der lokalen PV-Stromerzeugung und emissionsfreier Wärme aus Tiefengeothermie. Eine noch deutlich bessere Klimabilanz wird mit der Variante „Dietenbach KliEn“ erzielt. Die bessere Bilanz resultiert neben der hohen Nutzung von emissionsfreier Umweltwärme (Grundwasser, Abwasserwärme, Elektrolyseabwärme) durch die zusätzliche Gutschrift für den grünen Wasserstoff, der außerhalb des Quartiers fossile Energieträger im Bereich Mobilität und Industrie substituieren soll. Hierbei liegt die Annahme zugrunde, dass der erzeugte Wasserstoff zu jeweils gleichen Anteilen in der Mobilität und Industrie verwertet wird.

Ergänzend ist in Abbildung 18 die Klimabilanz für das Szenario „progressiv“ abgebildet. Die Detailbeschreibung der Szenarien erfolgt in Kapitel 6.5.1.

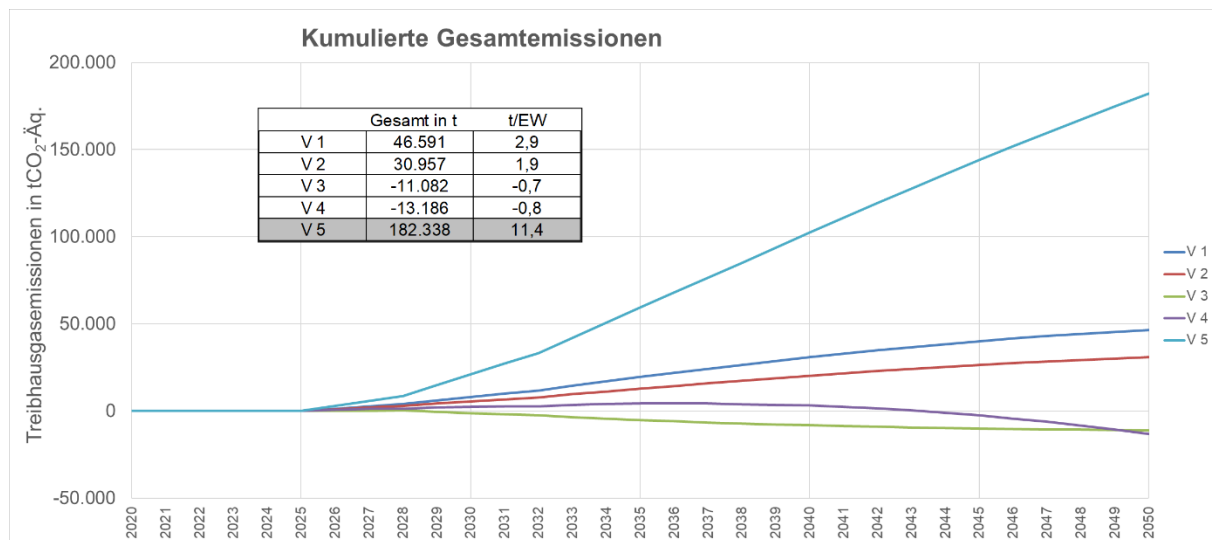


Abbildung 17: Klimabilanz 2020 – 2050 (Szenario „moderat“)

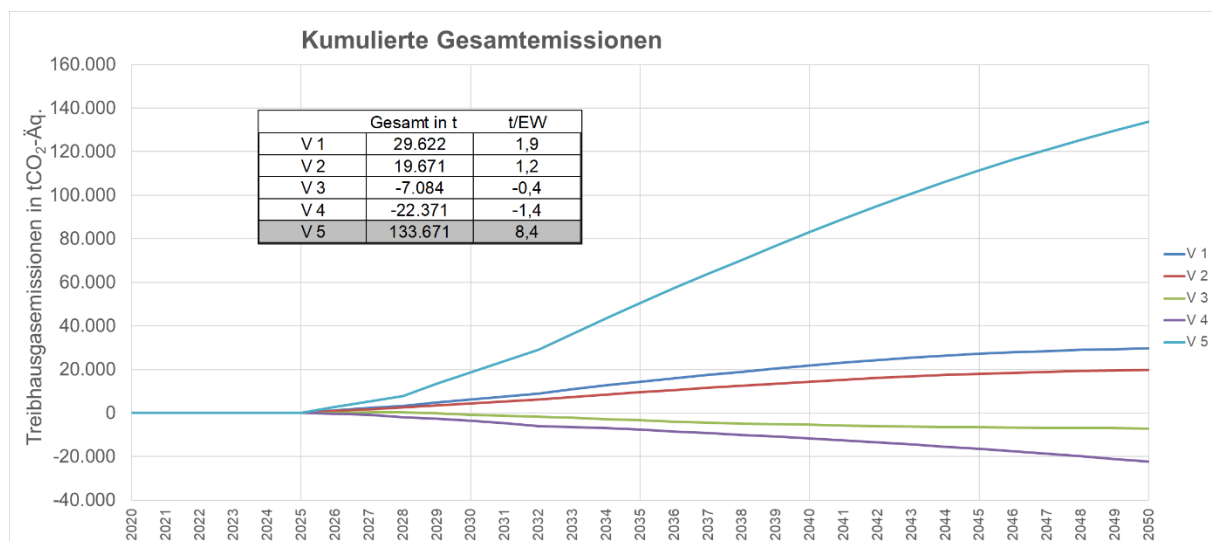


Abbildung 18: Klimabilanz 2020 – 2050 (Szenario „progressiv“)

6.3 Investitionskosten

Die in Abbildung 19 dargestellten Investitionskosten beinhalten alle primär für die Energieversorgung relevanten Investitionen (KG 420 Wärmeerzeugung, PV, Energieinfrastrukturelemente (ohne Stromnetz im Quartier)), die bis zur Umsetzung des BA 6 als Erstinvestition anfallen.

Die niedrigsten Investitionskosten hat dabei die Variante V3 Tiefengeothermie, da hier die Kosten für die Erschließung des Tiefengeothermiepotenzials nicht im Quartier anfallen. Ungefähr auf gleichem Niveau befinden sich die Investitionskosten von V2 und V4. Bei V4 Dietenbach KliEn wird deutlich, dass ein Großteil der Investitionskosten für die zentrale Energieinfrastruktur beim Betreiber (Energieversorger) anfällt. Auf Ebene der Gebäude (KG 400) kann der Investitionsanteil durch die vergleichsweise einfache Anlagentechnik (Übergabestationen) auf niedrigem Niveau gehalten werden (wie bei V3).

Bei allen Varianten wird ersichtlich, dass die Solarisierung mit Photovoltaik einen signifikanten Anteil an den Investitionskosten ausmacht. Ein wirtschaftlicher Betrieb der Photovoltaikanlagen wird in der Regel durch Einsparungen bei den Strombezugskosten und eine garantierte gesetzliche Einspeisevergütung für den Solarstrom erreicht.

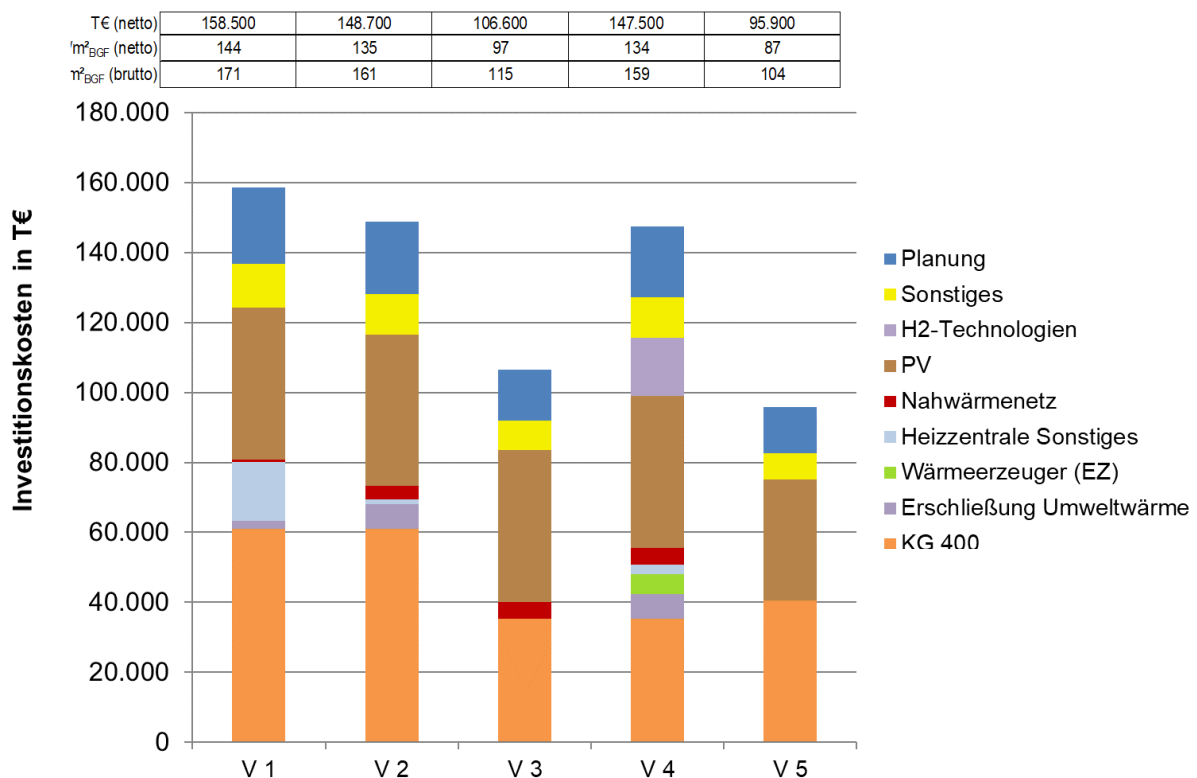


Abbildung 19: Investitionskosten KG 420 + PV + Energieinfrastruktur

In Abbildung 20 sind zusätzlich die Investitionskosten für das Gebäude (Bauwerk, KG 300) enthalten. Der Variantenvergleich zeigt auf, dass die höchsten Kosten durch diese Kostengruppe entstehen. Unter der Berücksichtigung der Kosten inkl. der KG 300 werden die Investitionskostenunterschiede der einzelnen Varianten relativ gering.

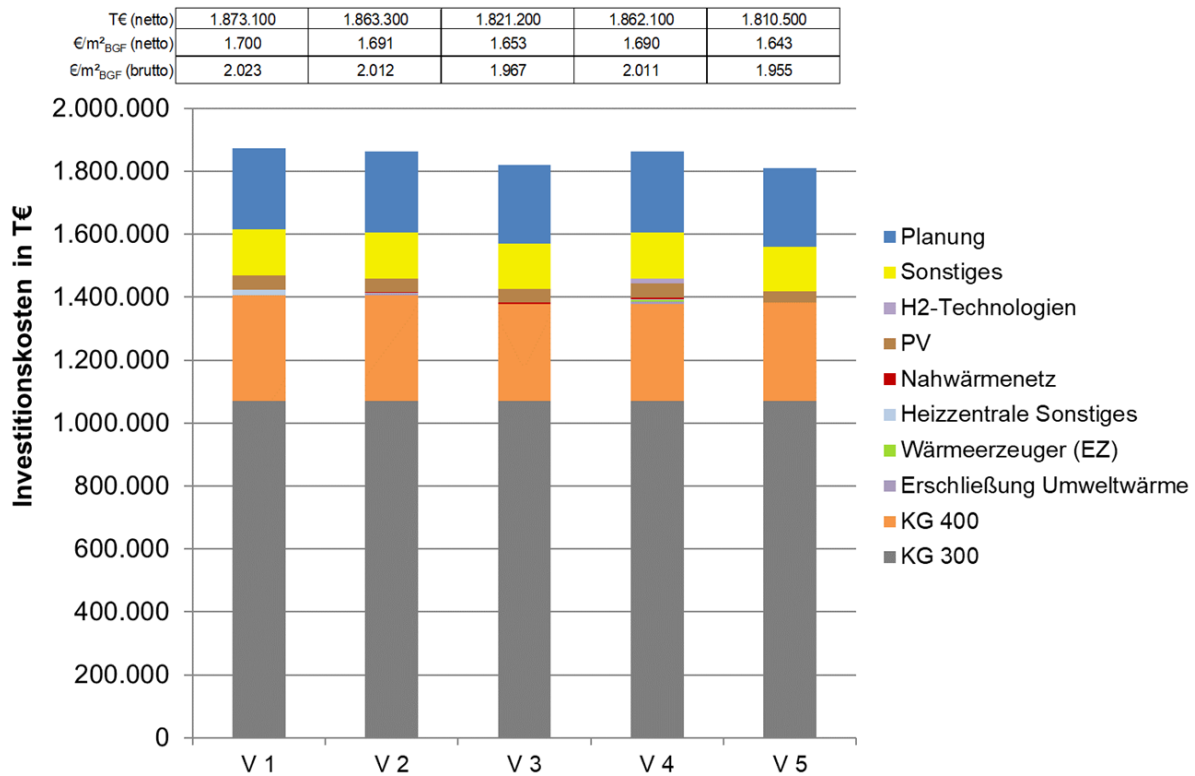


Abbildung 20: Investitionskosten KG 300 + 400 + Energieinfrastruktur

In der nachfolgenden Tabelle 2 sind die Anfangsinvestitionen im Detail aufgeführt.

Tabelle 2: Übersicht der Anfangsinvestitionen

Summe der Anfangsinvestitionen		V 1	V 2	V 3	V 4	V 5
KG 300	T€	1.070.587	1.070.587	1.070.587	1.070.587	1.070.587
KG 400	T€	334.217	334.217	308.490	308.490	313.645
Erschließung Umweltwärme	T€	2.150	7.030	0	7.030	0
Wärmeerzeuger (EZ)	T€	0	0	0	5.732	0
Heizzentrale Sonstiges	T€	16.932	1.255	0	2.712	0
Nahwärmenetz	T€	768	3.897	4.872	4.872	0
PV	T€	43.318	43.318	43.318	43.318	34.654
H2-Technologien	T€	0	0	0	16.600	0
Sonstiges	T€	146.797	146.030	142.727	145.934	141.889
Planung	T€	258.363	257.013	251.199	256.844	249.724
Gesamtinvestition	T€	1.873.132	1.863.348	1.821.192	1.862.119	1.810.498

6.4 Jahresgesamtkosten

Die Analyse der Jahresgesamtkosten berücksichtigt neben den kapitalgebundenen Kosten (Erst- und Ersatzinvestition, Restwert) auch die betriebsgebundenen Kosten (Instandsetzung, Wartung, Energiekosten, Energieerlöse) und stellt damit eine Vollkostenbetrachtung über den Zeitraum bis 2050 dar. Die resultierende Annuität wird angelehnt an die Berechnungsmethoden der VDI 2067 ermittelt. Der Berechnung zugrunde liegende Rahmenbedingungen sind in Kapitel 8.14 aufgeführt.

In Abbildung 22 sind die Jahresgesamtkosten der Vergleichsvarianten dargestellt. Die Abbildung setzt sich aus Säulenpaaren zusammen. Die linke Säule bilden die Kosten, die im Quartier entstehen. Die rechte Säule beinhaltet Erlöse durch z.B. Verkauf von PV-Strom in das öffentliche Netz oder Erlöse durch die Vermarktung des grünen Wasserstoffs außerhalb von Dietenbach. Die Kosten abzüglich der Erlöse bilden die Jahresgesamtkosten, die als relevante Vergleichsgröße über den Betrachtungszeitraum bis 2050 dienen. Variante 3 und 4 haben die niedrigsten Gesamtkosten und liegen auf dem Kostenniveau der konventionellen Vergleichsvariante.

Bei den einzelnen Varianten ergeben sich Unterschiede bei der Zusammensetzung der Kosten. So hat Variante 3 gegenüber den Variante 1 und 2 zwar niedrigere kapitalgebundene Kosten, aber höhere Energiekosten, die in Summe zu vergleichbaren Jahresgesamtkosten führen. Die kapitalgebundenen Kosten der Variante 4 entsprechen denen der Varianten 1 und 2. Die höheren Energiekosten durch den Elektrolysestrom werden dabei aber durch die Vermarktung des grünen Wasserstoffs wieder ausgeglichen, so dass Variante 4 zusammen mit der fossilen Variante V5 die niedrigsten Kosten aufweist.

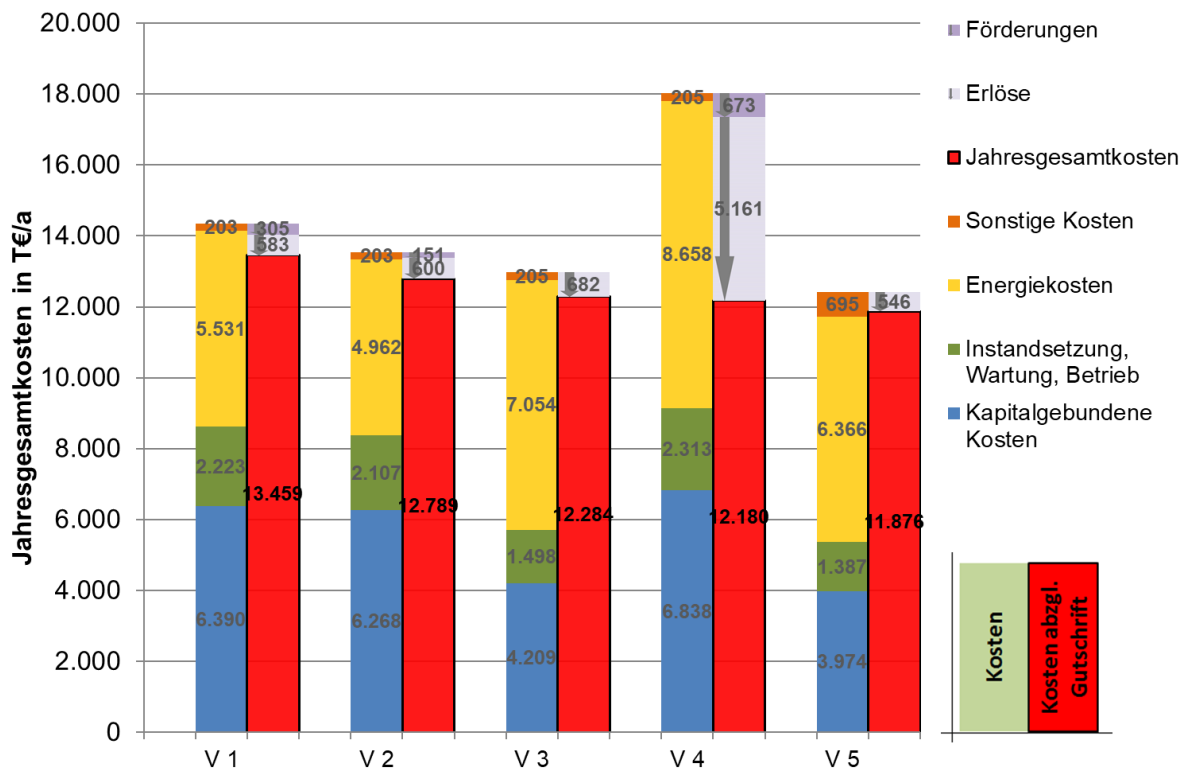


Abbildung 21: Jahresgesamtkosten (KG 420 + PV + Energieinfrastruktur)

In Abbildung 22 sind zusätzlich die Kosten der KG 300 mit in der Wirtschaftlichkeitsberechnung berücksichtigt. Die KG 300 macht den größten Kostenbestandteil der Jahresgesamtkosten aus. Bei dieser Betrachtung liegen die Jahresgesamtkosten aller Varianten auf einem vergleichbaren Kostenniveau.

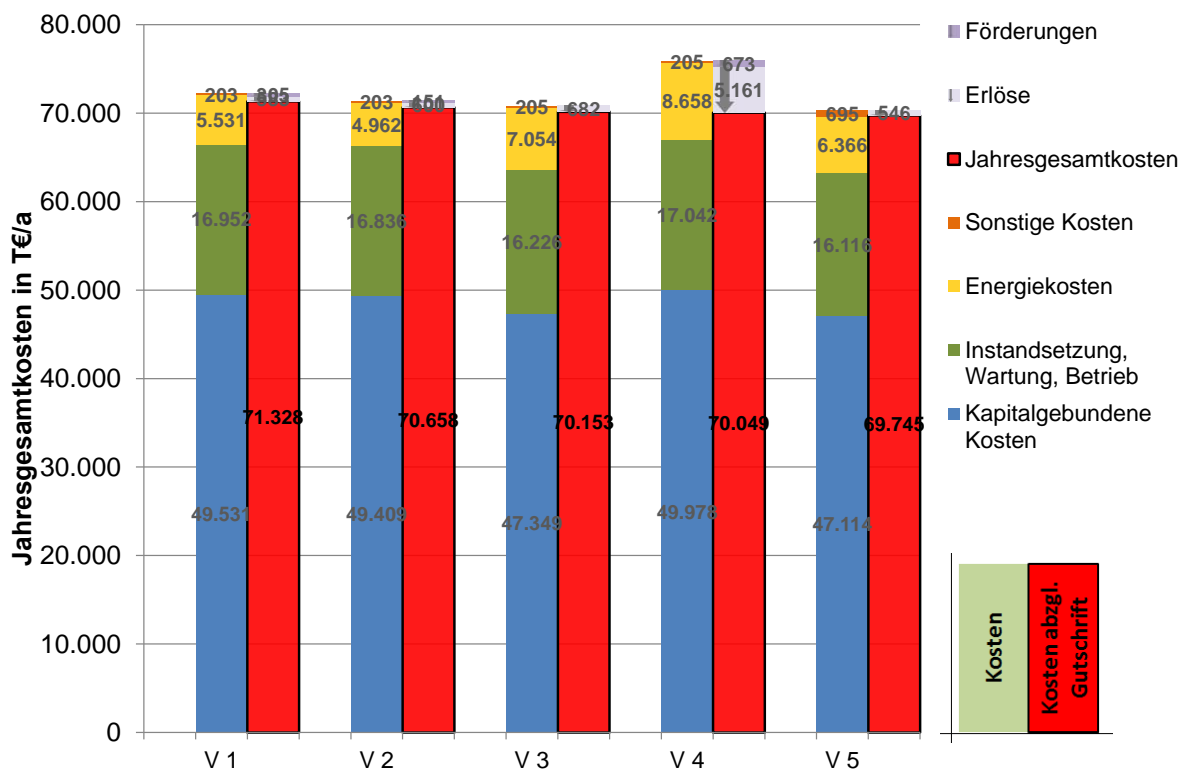


Abbildung 22: Jahresgesamtkosten (KG 300 + 400 + Energieinfrastruktur)

In Tabelle 3 sind die einzelnen Bestandteile der Jahresgesamtkosten im Detail aufgelistet.

Tabelle 3: Jahresgesamtkosten nach Kostenkategorien

Jahresgesamtkosten		V 1_JaKo	V 2_JaKo	V 3_JaKo	V 4_JaKo	V 5_JaKo
Kapitalgebundene Kosten	T€/a	49.531	49.409	47.349	49.978	47.114
Instandsetzung, Wartung, Betrieb	T€/a	16.952	16.836	16.226	17.042	16.116
Energiekosten	T€/a	5.531	4.962	7.054	8.658	6.366
Sonstige Kosten	T€/a	203	203	205	205	695
Erlöse	T€/a	583	600	682	5.161	546
Förderungen	T€/a	305	151	0	673	0
Jahresgesamtkosten	T€/a	71.327,7	70.658,2	70.153,2	70.048,8	69.745,0
Kennwert Jahresgesamtkosten	€/((m²*Mon.))	5,39 €/((m²*Mon.))	5,34 €/((m²*Mon.))	5,31 €/((m²*Mon.))	5,30 €/((m²*Mon.))	5,28 €/((m²*Mon.))

Vollkostenbetrachtung Wärme

In Tabelle 4 sind zusätzlich zu den Jahresgesamtkosten für das Gesamtquartier auch die Wärmekosten je MWh und für eine repräsentative Wohnung (Wohnfläche rund 75 m²) abgebildet. Die hier aufgeführten Wärmepreise sind als Mischpreise angegeben (Arbeitspreis, Grundpreis inkl. Investitionskosten für die KG 420 und Energieinfrastruktur → ohne Gewinnmarge). Die Wärmepreise belaufen sich für die Varianten 3 und 4 auf rund 140 – 145 €/MWh bzw. auf Wärmekosten für eine Beispielwohnung von rund 50 €/Monat.

Tabelle 4: Jahresgesamtkosten und Wärmepreisberechnung

Basis	V 1_JaKo	V 2_JaKo	V 3_JaKo	V 4_JaKo	V 5_JaKo
Investitionskosten KG 400 + Energieinfrastruktur in €/m ² BGF	460	451	413	450	403
Investitionskosten KG 400 (nur Gebäude) in €/m ² BGF	303	303	280	280	285
Jahresgesamtkosten in T€/a	71.338	70.669	70.164	70.060	70.116
Instandhaltungskosten Wärme in T€/a	1.423	1.307	698	1.016	747
Wärmepreis in €/MWh	170	153	145	141	142
Kosten Wärme je WE in €/Monat	59	53	50	48	49

6.5 Sensitivitätsanalyse

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wird die Robustheit der Ergebnisauswertung überprüft indem verschiedene Szenarien zur Energiepreis- und Investitionskostenentwicklung vergleichend gegenübergestellt wird. In den folgenden Abschnitten werden zunächst die Szenarien beschrieben und im Anschluss die Ergebnisse dargestellt.

6.5.1 Szenarienübersicht

Die in Kapitel 6.4 gezeigten Ergebnisse basieren auf dem **Szenario „Basis“**. In diesem Szenario ist für eine bessere Interpretierbarkeit und Transparenz der Ergebnisse mit einer Energie- und Investitionskostensteigerung von 0 % pro Jahr und einem Diskontierungszinssatz von 0 % gerechnet. Dies bedeutet, dass alle zukünftigen Investitionen und Zahlungen auf dem heutigen Wertniveau in der Wirtschaftlichkeitsberechnung berücksichtigt werden. Der Vergleich mit heutigen Energiepreisen und Versorgungskosten ist mit diesem Szenario am geeignetsten.

Im **Szenario „Moderat“** wird mit einer Steigerung/Absenkung der Energiepreise und Investitionskosten gerechnet, die auf Basis von historischen Entwicklungen abgeleitet wurden.

Das **Szenario „Progressiv“** geht grundsätzlich von einer stärkeren Steigerung/Absenkung als im Szenario „moderat“ aus. Die den Szenarien zugrunde liegenden Annahmen sind detailliert in der „Anlage: Ökonomischen Rahmenbedingungen“ und „Anlage: Energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen“ beschrieben.

Ergänzend ist ein Szenario **„Moderat + Baukostensteigerung 3 %/a“** aufgeführt, das den Rahmenbedingungen des Szenarios „Moderat“ entspricht und für die KG 300 + 400 mit einer Preissteigerung von 3 % pro Jahr rechnet.

6.5.2 Ergebnisse der Szenarienanalyse

Die Ergebnisse der Szenarienanalyse sind in Tabelle 5 aufgelistet. Neben den Investitionskosten sind die Jahresgesamtkosten, der Wärmepreis (Mischpreis aus Grund- und Arbeitspreis) und die Wärmekosten für eine repräsentative Wohneinheit aufgeführt.

Bei dem Vergleich der erarbeiteten Versorgungsvarianten 1 bis 4 weisen die Variante 3 „Tiefengeothermie“ und die Variante 4 „Dietenbach KliEn“ die niedrigsten Jahresgesamtkosten und Wärmepreise für die Endverbraucher auf. Diese Aussage gilt für alle betrachteten Szenarien aus Tabelle 5 als auch im erweiterten Vergleich in Kapitel 8.15.

Die fossile Vergleichsvariante V5 liegt bei den Jahresgesamtkosten auf dem Niveau der Varianten V3 und V4. Im Szenario „Progressiv“ steigen die Wärmepreise der V5, durch den hohen Anteil von extern bezogener fossiler Energie, um mehr als 15 % über die Preise bei den Varianten V3 und V4.

Tabelle 5: Ergebnis der Szenarienanalyse

Basis	V 1_JaKo	V 2_JaKo	V 3_JaKo	V 4_JaKo	V 5_JaKo
Investitionskosten KG 400 + Energieinfrastruktur in €/m²BGF	460	451	413	450	403
Investitionskosten KG 400 (nur Gebäude) in €/m²BGF	303	303	280	280	285
Jahresgesamtkosten in T€/a	71.338	70.669	70.164	70.060	70.116
Instandhaltungskosten Wärme in T€/a	1.423	1.307	698	1.016	747
Wärmepreis in €/MWh	170	153	145	141	142
Kosten Wärme je WE in €/Monat	59	53	50	48	49
Moderat	V 1_JaKo	V 2_JaKo	V 3_JaKo	V 4_JaKo	V 5_JaKo
Investitionskosten KG 400 + Energieinfrastruktur in €/m²BGF	511	502	459	492	450
Investitionskosten KG 400 (nur Gebäude) in €/m²BGF	351	351	324	324	329
Jahresgesamtkosten in T€/a	77.899	77.191	76.440	76.181	76.202
Instandhaltungskosten Wärme in T€/a	1.572	1.442	770	1.121	825
Wärmepreis in €/MWh	193	175	164	160	155
Kosten Wärme je WE in €/Monat	66	60	56	55	53
Progressiv	V 1_JaKo	V 2_JaKo	V 3_JaKo	V 4_JaKo	V 5_JaKo
Investitionskosten KG 400 + Energieinfrastruktur in €/m²BGF	538	529	483	513	475
Investitionskosten KG 400 (nur Gebäude) in €/m²BGF	377	377	348	348	354
Jahresgesamtkosten in T€/a	81.349	80.728	79.523	78.977	80.221
Instandhaltungskosten Wärme in T€/a	1.736	1.592	851	1.237	911
Wärmepreis in €/MWh	200	184	162	161	176
Kosten Wärme je WE in €/Monat	69	63	56	55	60
Moderat + Baukostensteigerung 3%/a (Randb. PGD)	V 1_JaKo	V 2_JaKo	V 3_JaKo	V 4_JaKo	V 5_JaKo
Investitionskosten KG 400 + Energieinfrastruktur in €/m²BGF	567	555	507	542	498
Investitionskosten KG 400 (nur Gebäude) in €/m²BGF	410	410	379	379	385
Jahresgesamtkosten in T€/a	91.140	90.429	89.116	89.079	88.940
Instandhaltungskosten Wärme in T€/a	1.572	1.442	770	1.121	825
Wärmepreis in €/MWh	215	196	175	175	166
Kosten Wärme je WE in €/Monat	74	67	60	60	57

7 Bewertung und Empfehlung

7.1 Gesamtbewertung mittels Bewertungsmatrix

Neben der Klimabilanz und Wirtschaftlichkeit werden im Rahmen des Energiekonzepts weitere Bewertungskriterien für eine ganzheitliche und transparente Entscheidungsgrundlage herangezogen. Die Bewertungsmatrix weist eine klare Spitzenbewertung für die Variante 4 „Dietenbach KliEn“ aus. Dies auch bei einer Gleichgewichtung aller Kriterien (V4 35 Punkte, V3 33 Punkte, V2 31 Punkte, V1 28 Punkte).

	Gewichtung des Kriteriums
Flächenbedarf Baufeld	1
Flächenbedarf Infrastruktur	1
Anteil lokaler Erzeugung bezogen auf Energiebedarf (2050)	3
Klimabilanz 2050 (in t/a*)	5
Klimabilanz 2026 bis 2050 (in t*)	4
Sektorenkopplung	1
Mehrwert über Quartier hinaus	2
Mobilität	2
Kühlung der Gebäude	2
Verfügbarkeit Fördermittel	
Gebäude	2
Infrastruktur	2
Komplexität in der Umsetzung	1
Investitionskosten	
Gebäude	2
Infrastruktur	2
Jahresgesamtkosten	5

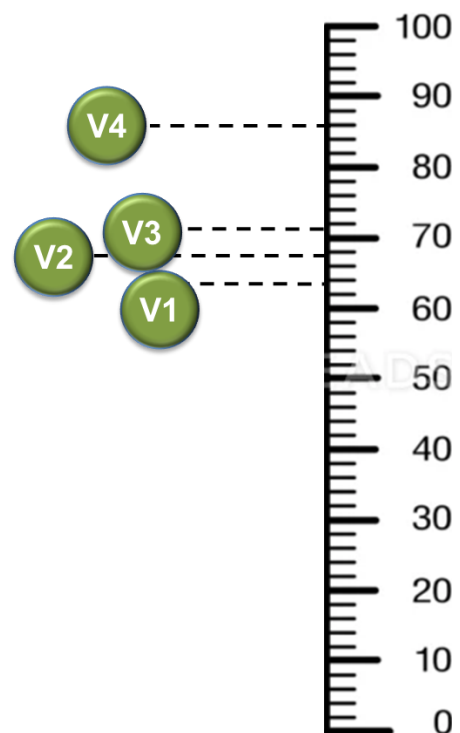


Abbildung 23: Ergebnis Bewertungsmatrix

7.2 Umsetzungsempfehlung

Das Ziel einer klimaneutralen Energieversorgung für den neuen Stadtteil Dietenbach kann mit den Varianten 3 Tiefengeothermie und 4 „Dietenbach KliEn“ erreicht werden. Aus Gutachtersicht empfehlen wir die Variante „Dietenbach KliEn“ für die Umsetzung.

Diese Variante hat die beste Klimabilanz bei vergleichbaren Jahresgesamtkosten. Zusätzlich sind die niedrigsten Investitionskosten auf Gebäudeebene durch die vereinfachte Anlagentechnik zu erwarten. Auf Ebene der Energieinfrastruktur resultieren die höchsten Investitionskosten durch die Erschließung der Umweltwärmequellen und die H₂-Infrastruktur, die zunächst durch den Energieversorger/ Betreiber zu tragen sind.

Das skalierbare Versorgungskonzept erlaubt einen sukzessiven Aufbau analog zur zeitlichen Entwicklung der BA 1 bis 6 sowohl für die Erschließung der Umweltwärme (wachsende Brunnengalerie), modulare Wärmepumpen in der Energiezentrale und das Wärmenetz.

Darüber hinaus hat die Variante „Dietenbach KliEn“ bei den weiteren Bewertungskriterien ebenso überzeugt und die beste Bewertung erreicht. Besonders überzeugend ist dabei der zukunftsfähige und kommunal-strategische Konzeptansatz, der neben der Klimaneutralität im Quartier auch einen Mehrwert für die Stadt und Region Freiburg schaffen kann. Grüner Wasserstoff für die Mobilität und Industrie aus lokaler, hocheffizienter Produktion. Der in Fahrt gekommene Ausbau der H₂-Anwendungen in Deutschland zeigt sich auch in der Stadt und Region Freiburg. Bedarfsanmeldungen zahlreicher potenzieller Abnehmer bezeugen das ernsthafte Interesse und Bedarf an grünem Wasserstoff aus der Region.

7.3 Sachstand Energieversorgung für den Bauabschnitt 1

Der modulare Ansatz der Vorzugsvariante 4 „Dietenbach KliEn“ sieht für die Wärmeversorgung des Bauabschnitt 1 (BA 1) die Elektrolyse-Abwärme und Grundwassernutzung vor. Die erforderlichen Brunnen (Entnahme und Injektion) werden zunächst nur für die Bedarfsdeckung des BA 1 erschlossen und in Zukunft bedarfsgerecht modular erweitert. Ebenso wird zunächst nur das Wärmenetz für den BA 1 ausgebaut. Die Elektrolyse zur Herstellung von grünem Wasserstoff ist dabei Bestandteil des Systems.

Aktuell erfolgen Abstimmungen zur Verortung und Ergiebigkeit der Brunnen sowie zu deren Auswirkungen auf den Grundwasserhaushalt.

Als Rückfalloption für das Wärmeversorgungskonzept des BA1 (falls Grundwasser nicht in erforderlichem Umfang vorhanden ist), könnte ein zeitlich früherer Nutzungsbeginn der Abwasserwärme den Grundwassereingriff reduzieren. Eine weitere Rückfalloption, laut Aussage des Betreibers des Wärmenetzes Weingarten/Rieselfeld, wäre ein Anschluss an dessen Versorgungssystem. Hierbei müsste aufgrund der ökologisch schlechteren Wärmeversorgung das Ziel der Klimaneutralität durch ergänzende Maßnahmen gewährleistet werden.

Grundsätzlich gilt auch, dass Tiefengeothermie als alternative zur Wärmepumpenwärme und zur Ergänzung der Elektrolyseabwärme einsetzbar ist.

7.4 Ausblick und nächste Schritte

Ausschreibung Energieversorgung

Die Wärmeversorgung für die ersten Bauabschnitte und für das Gesamtprojekt soll in zwei Teilen aufgrund der zeitlichen Erschließungszeiträume ausgeschrieben werden. Als sinnvoll wird die Aufteilung in Teil 1 (BA 1-4) und Teil 2 (BA 5-6) erachtet. Die Ausschreibung für die zentrale Energieversorgung umfasst die Umweltwärmeerschließung, die Energiezentrale (Wärme und Elektrolyse) und das Leitungsnetz. Es wäre auch denkbar, eine Trennung der Wasserstoff – Gewinnung und der Wärmeversorgung vorzunehmen, da es sich um unterschiedliche Vermarktungswege handelt.

Als Verfahrensart wird ein mehrstufiges Verfahren mit Definition der Eckpunkte (u.a. Zeiträume, Energiemengen, Beteiligte), Biervorauswahl, Festlegung der Ausschreibungsinhalte, Teilnehmergepräche und technisch/wirtschaftliche Bewertung vorgeschlagen. Wichtig ist dabei, dass die durch das Energiekonzept erreichten Ergebnisse hinsichtlich Solarenergienutzung, Effizienz der Wärmeversorgung und Klimaneutralität in ausreichend guter Qualität durch den künftigen Betreiber umgesetzt werden können.

Förderung

Im Rahmen der Energiekonzepterstellung wurden die Fördermöglichkeiten für die Vorzugsvariante „Dietenbach KliEn“ recherchiert. Aktuell sind bereits vorbereitende Skizzen für zwei Förderprogramme vorbereitet und eingereicht worden, die eine Förderung für die Planung und Umsetzung der Energieinfrastruktur ermöglichen sollen. Dies sind:

1. *Technologieoffensive H₂ im 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung*
Einreichung Projektantrag am 31.05.2021; Gemeinsamer Antrag von insgesamt sechs Quartiersprojekten mit Fokus H₂-Nutzung in Quartieren; Antragstellung durch das Steinbeis Innovationszentrum energieplus, Stuttgart; Bewilligung im Oktober 2021 eingegangen. Vorbereitung der Planung und Konkretisierung des Versorgungskonzepts.
2. *EFRE-Call Modellregion Grüner Wasserstoff in Baden-Württemberg*
Beteiligung am Konsortium „Südlicher Oberrhein“ mit Projekt Dietenbach; Ziel: Aufbau einer Modellregion H₂ mit Erzeugung, Verteilung und Nutzung

Weitere Fördermittel für das Wärmeversorgungssystem des Konzepts „Dietenbach KliEn“ werden voraussichtlich mit dem Programm „Bundesförderung effiziente Wärmenetze“ erwartet und sollen helfen, attraktive Wärmepreise für klimaneutrale Wärme zu ermöglichen.

Weitere Schritte

Das Gutachten zum Energiekonzept Dietenbach von EGS-Plan ist im Mai 2021 abgeschlossen worden. Nach Beschluss des Gemeinderats soll die Wärmeversorgung ausgeschrieben werden.

8 Anhang

8.1 Klimaneutralität – Ziel für den Stadtteil Dietenbach

 Klimaschutzplan 2050 Kabinettschluss vom 14. November 2016	 Klimaschutz in Kommunen Praxisleitfaden Kommunen sind Vorbild für Energie	 DGNB Deutsches Institut für Zertifizierung Green Building Certification	 aktivplus	 Effizienzhaus PLUS	 Freiburg Dietenbach
Bilanzumfang					
Gebäudebetrieb					
Nutzerstrom					
Graue Energie					
Mobilität	Zzgl. weitere Sektoren wie Industrie, ...				
Bilanzgrenze	Deutschland	Kommune (Territorialprinzip)			Gemarkung
Bilanzzeitraum	1990 - 2050	1990 - 2050	Jahresbilanz 1 a	Jahresbilanz 1 a	2025 – 2050
Ziel/Anforderung	80–90 % Minderung 1990 bis 2050	Kommunale Ziele	THG-Bilanz in 2050 ≤ 0 kg/(m ² ·a)	THG-Bilanz ≤ 14 kg/(m ² ·a)	THG-Bilanz in 2025 - 2050 und im Jahr 2050 ≤ 0 kg/(m²·a)

THG: Treibhausgasemissionen

Eigene Darstellung EGS-plan

8.2 Grundlage Gebäudeflächen nach Bauabschnitten und Nutzungsformen

Nutzung	BA1	BA2	BA3	BA4	BA5	BA6	GESAMT
	[m²BGF]	[m²BGF]	[m²BGF]	[m²BGF]	[m²BGF]	[m²BGF]	[m²BGF]
Wohnen	190.460	166.760	167.810	67.740	182.070	37.070	811.910
Büro und Dienstleistung	23.490	18.110	1.330	2.030	2.000	2.980	49.940
Gewerbe Handwerk	8.950	0	0	0	14.480	9.840	33.270
Sondernutzung	0	0	0	26.990	0	0	26.990
Schule und Sport	21.510	22.600	820	0	860	0	45.790
KiTa	6.290	5.580	4.530	2.720	4.480	1.000	24.600
Quartiersgarage	29.710	15.300	16.000	18.450	19.250	10.600	109.310
	280.410	228.350	190.490	117.930	223.140	61.490	1.101.810

8.3 Spezifischer Energiebedarf nach Nutzungsformen (Erzeugernutzenergie)

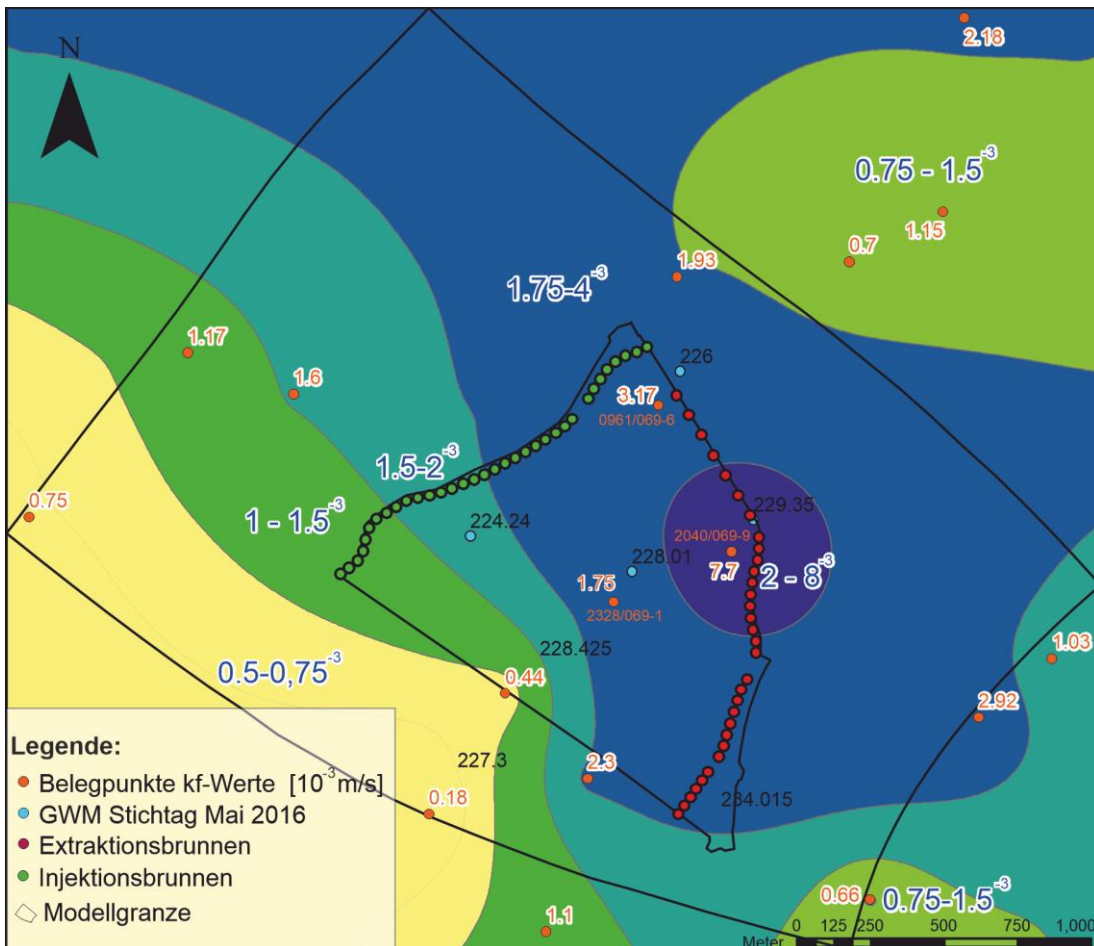
Nutzungsform	Heizung	Warmw.	Kälte	Allg.Strom	Nutzerstrom
[kWh/m²BGF*a]					
Wohnen	35	20	1,5	6	19
Büro und Dienstleistung	40	2	13	13	93
Gewerbe Handwerk	50	2	0	5	100
Sondernutzung	41	12	19	12	32
Schule und Sport	11	2	7	6	17
KiTa	11	11	0	3	21
Quartiersgarage	0	0	0	2	0

8.4 Absoluter Energiebedarf nach Nutzungsformen

Nutzung	Heizung	Warmw.	Kälte	Allg.-Strom	Nutzerstrom
[MWh/a]					
Wohnen	28.417	16.238	402	4.871	15.426
Büro und Dienstleistung	1.998	100	649	649	4.644
Gewerbe & Handwerk	1.664	67	0	166	3.327
Sondernutzung	1.107	324	513	324	864
Schule und Sport	504	92	321	275	778
KiTa	271	271	0	74	517
Quartiersgarage	0	0	0	219	0
	33.959	17.091	1.884	6.578	25.556

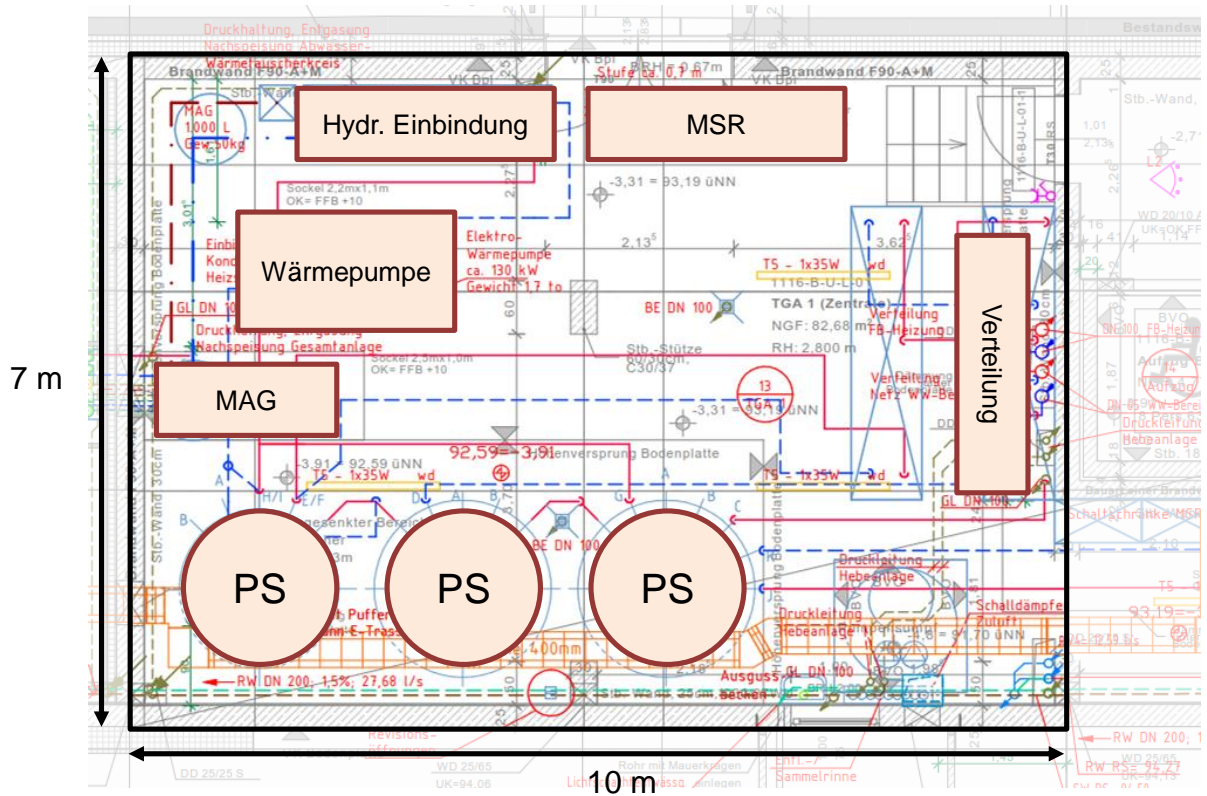
8.5 Durchlässigkeit Grundwasserleiter gemäß Gutachten KIT AGW

Als Berechnungsgrundlage dienen Ergiebigkeitspumpversuche die im Baugebiet Dietenbach Ende 2020 im Auftrag des Umweltschutzamts durchgeführt wurden, um eine verlässliche Basis für die Durchlässigkeit des oberen Grundwasserleiters für das Grundwassermodell zu erhalten.



Durchlässigkeit kf-Werte Dietenbach – Quelle KIT AGW Dezember 2020

8.6 Variante 1 – Flächenbedarf Technik im Gebäude Umsetzungsbeispiel



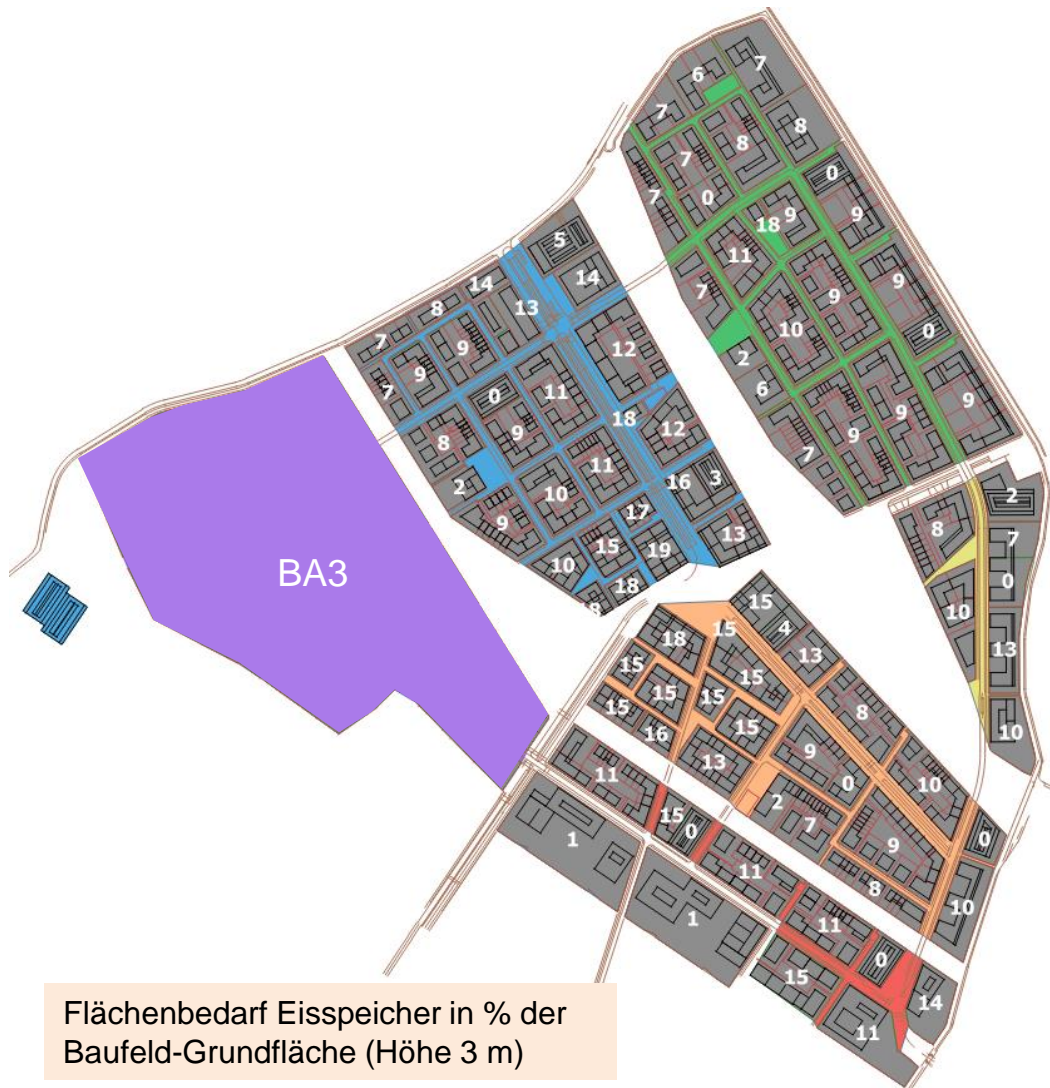
Eigene Darstellung EGS-plan

Umsetzungsbeispiel: Wärmepumpe mit 120 kW für 75 Wohneinheiten

PS = Pufferspeicher

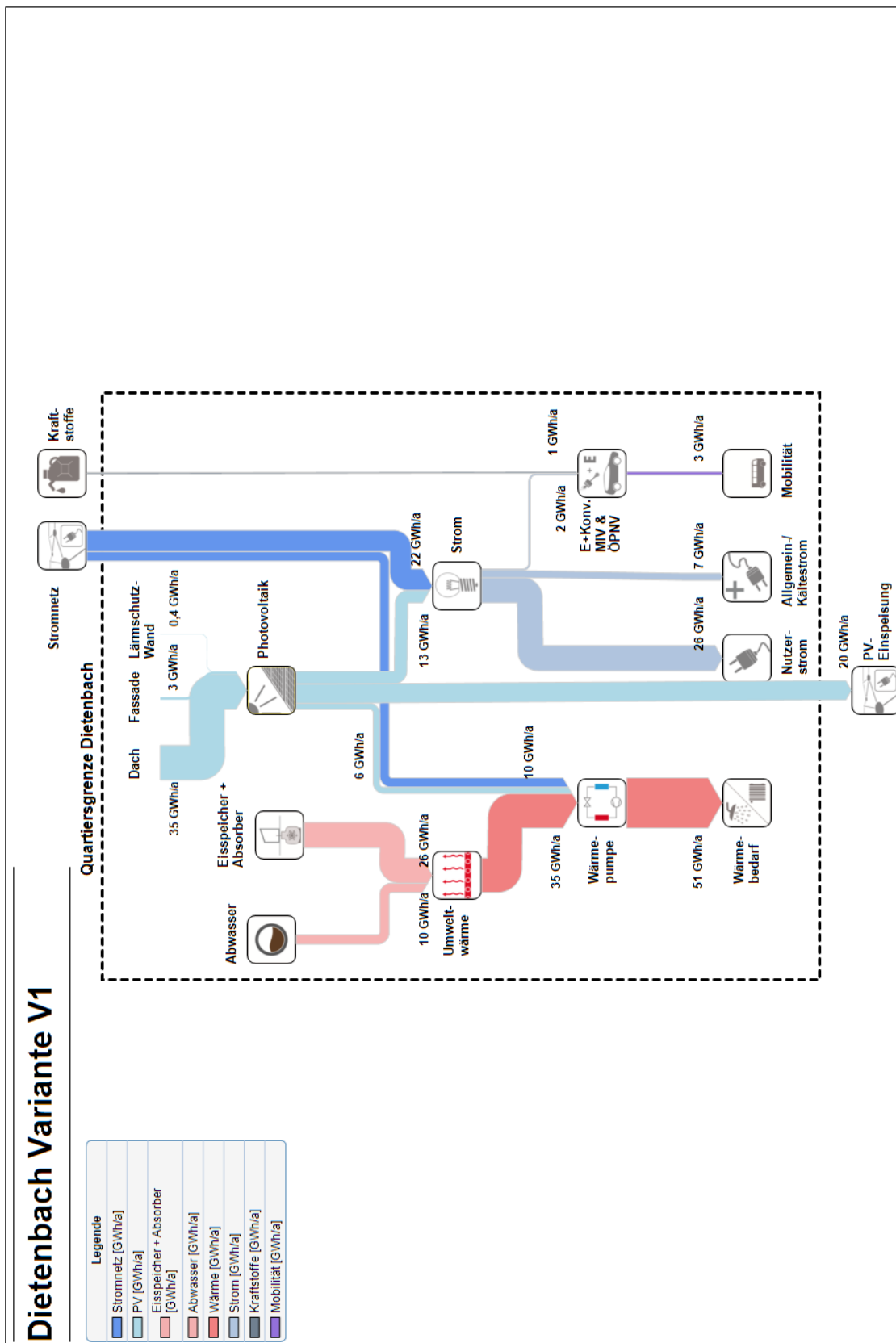
MAG = Membran Ausdehnungsgefäß

8.7 Variante 1 – Flächenbedarf Eisspeicher in % der Baufeld-Grundfläche

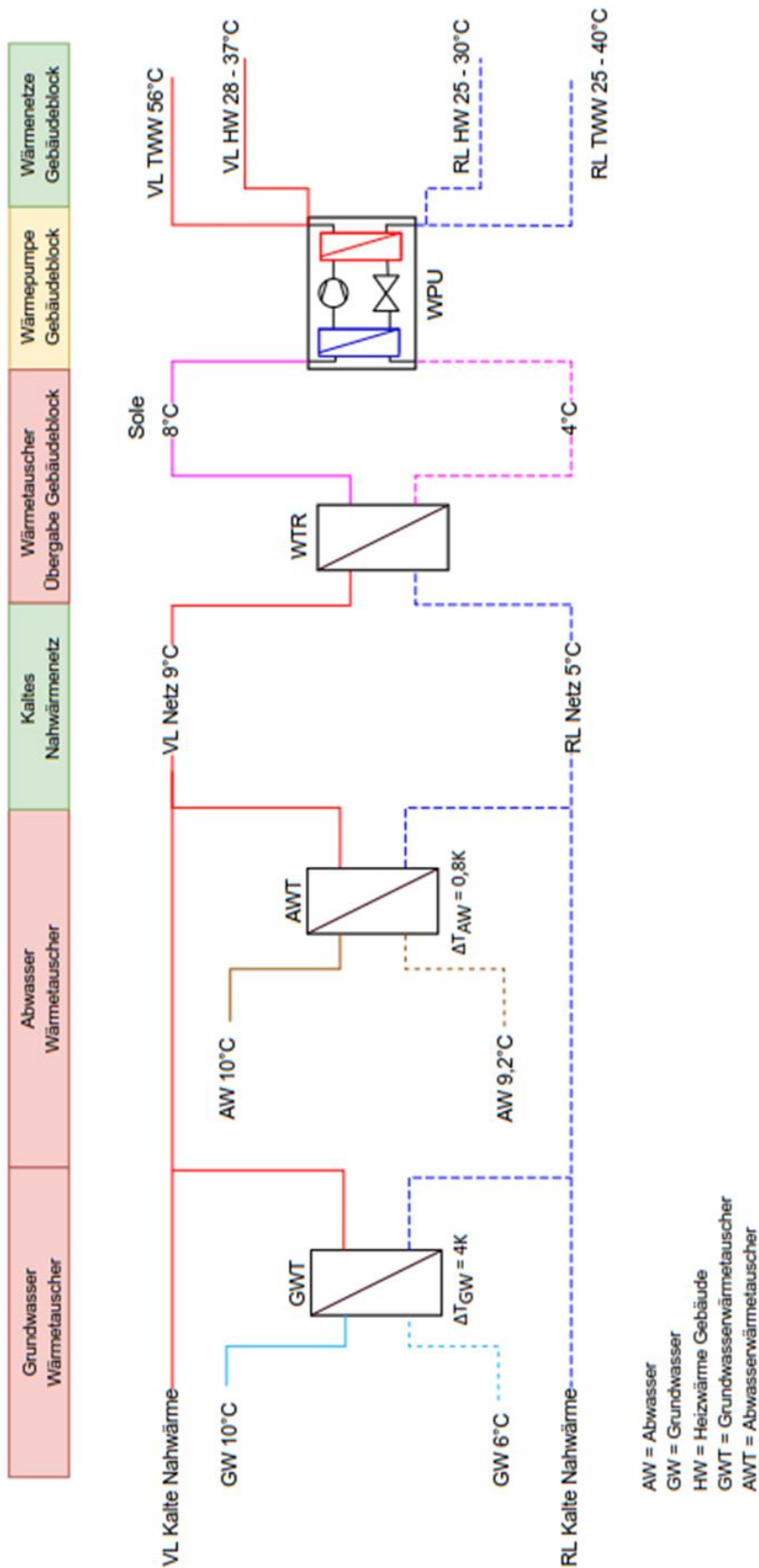


Eigene Darstellung EGS-plan

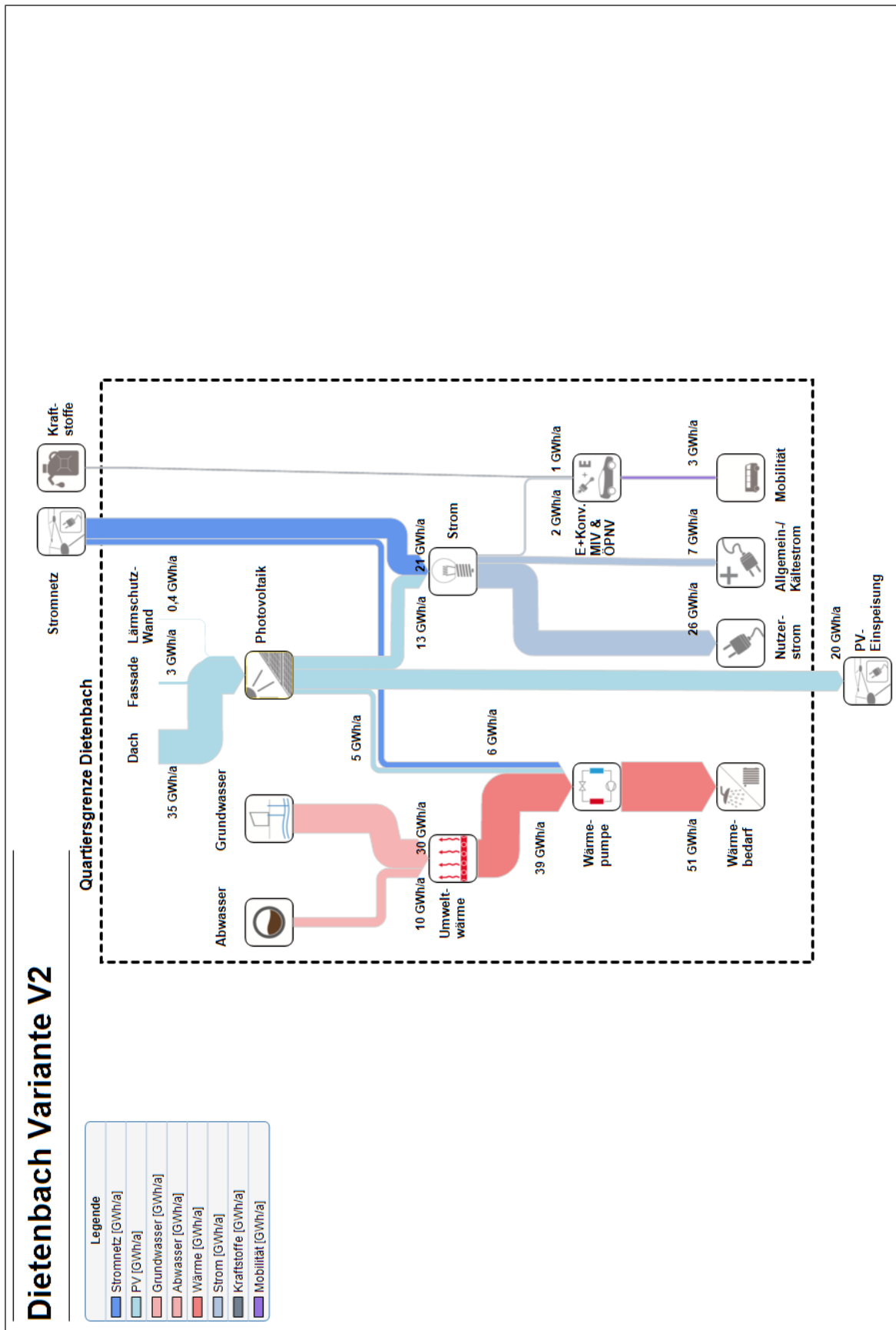
8.8 Energiefluss-Diagramm Variante 1



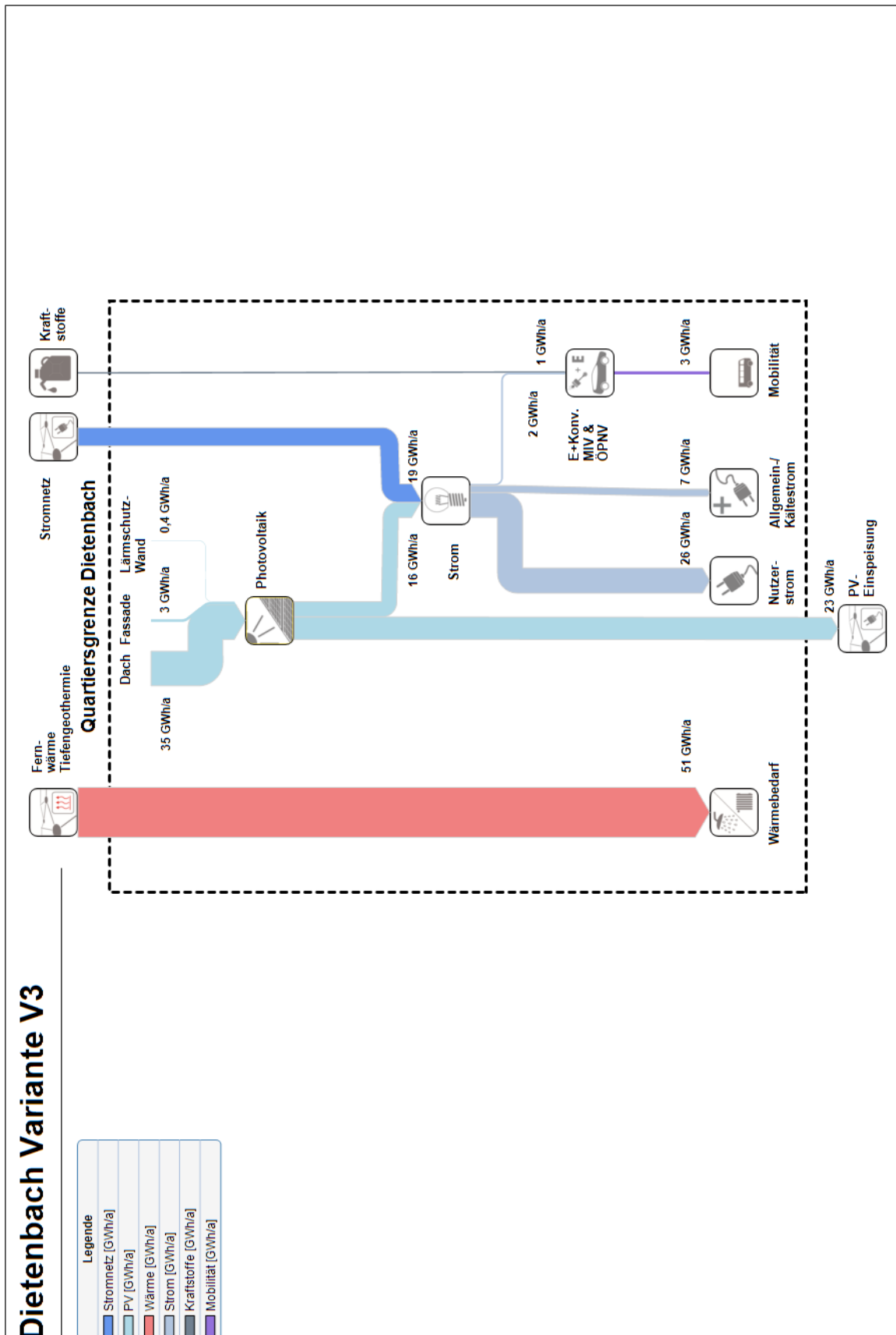
8.9 Synoptische Darstellung – Anlagenschema Variante 2



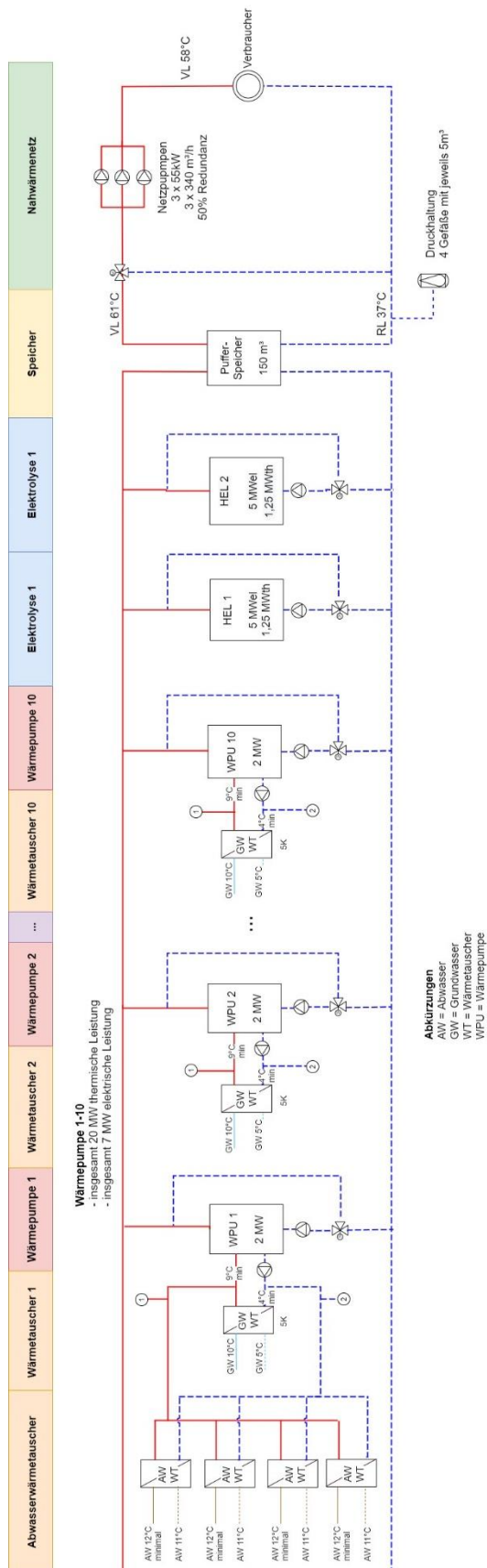
8.10 Energiefluss-Diagramm Variante 2



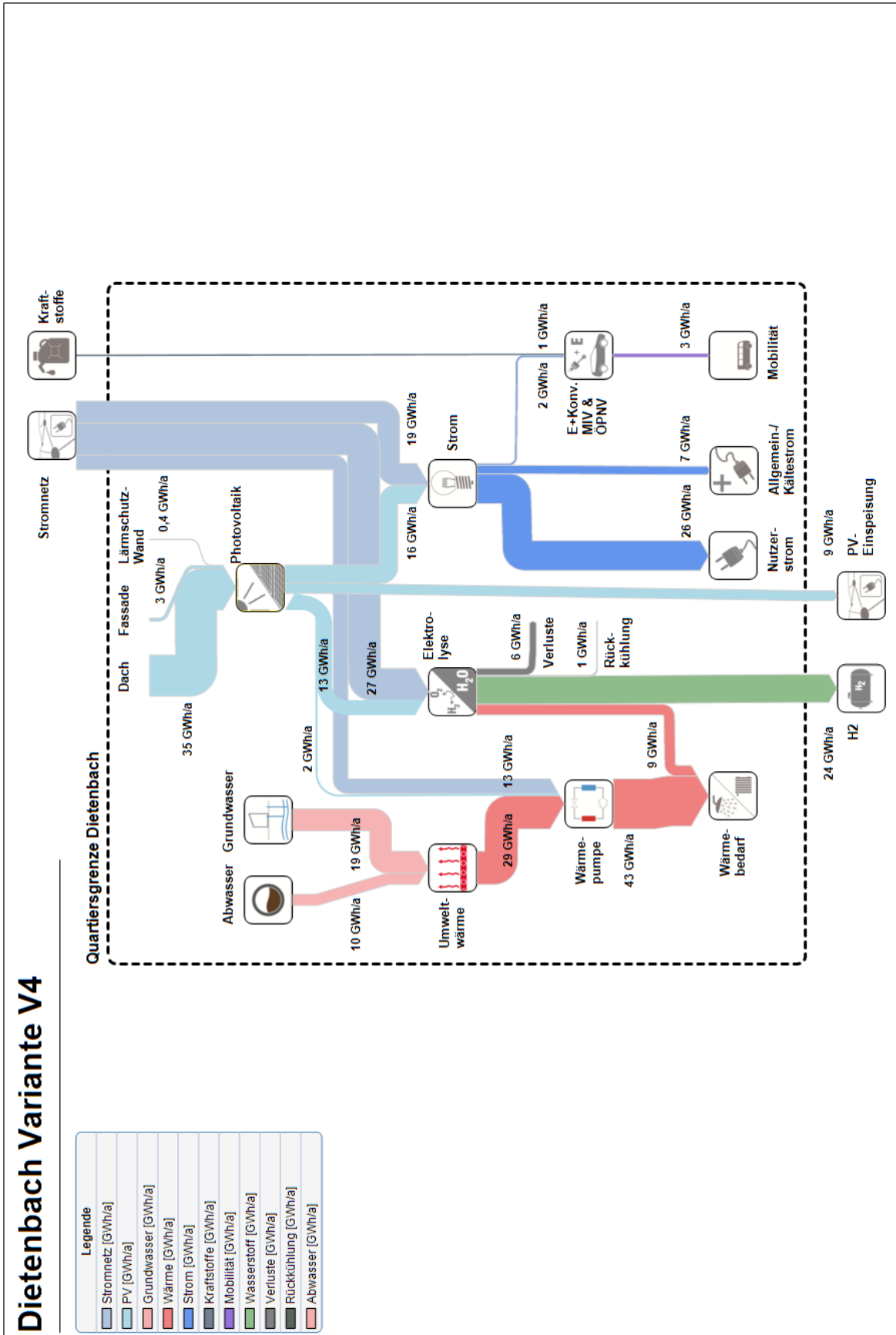
8.11 Energiefluss-Diagramm Variante 3



8.12 Synoptische Darstellung – Anlagenschema Variante 4



8.13 Energiefluss-Diagramm Variante 4



8.14 Rahmenbedingungen Wirtschaftlichkeitsberechnung

Energiepreise (netto, pro MWh)

Fernwärme aus Tiefengeothermie	80 €/MWh
Strom für Gebäude	216 €/MWh
Strom für Elektrolyse	50 €/MWh
Umweltwärme aus Abwasser/ Grundwasser	0 €/MWh
Benzin	139 €/MWh
Diesel	111 €/MWh

Erlöse aus Energievermarktung (netto, pro MWh)

PV Strom (Einspeisevergütung 2026)	35 €/MWh
H ₂ -Verkauf Gasnetzeinspeisung	200 €/MWh
H ₂ -Verkauf Industrie	133 €/MWh
H ₂ -Verkauf Mobilität	233 €/MWh

CO₂-Bepreisung (Bereich Mobilität)

Szenario „Moderat“	2025 → 55 €/t
Szenario „Progressiv“	2025 → 187 €/t

Details siehe „Anlage: Energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen“

Fördermittel

Fördermittel gemäß „Bundesförderung energieeffiziente Gebäude“ sind in den Varianten nicht mitberücksichtigt.

Fördermittel für die Energieinfrastruktur (nicht auf Gebäudeebene und ohne Wärmenetz) sind bei den Varianten 1, 2 und 4 mit 40 % der Investitionskosten angesetzt.

8.15 Erweiterte Sensitivitätsanalyse

Im Rahmen der Jahresgesamtkostenbetrachtung in Kapitel 6.5.2 sind die verschiedenen Szenarienergebnisse mit einem Diskontierungszinssatz von 0 % ausgewiesen. Dies bedeutet, dass zukünftige Zahlungen mit den gleichen Barwert aufweisen wie heutige Zahlungen. Den Effekt verschiedener Diskontierungszinssätze auf die Kosten und Wärmepreise zeigen die nachfolgenden Tabellen.

Wirtschaftlichkeitsvergleich mit Diskontierungszinssatz von 2 %/a

	V 1_JaKo	V 2_JaKo	V 3_JaKo	V 4_JaKo	V 5_JaKo
Basis					
Investitionskosten KG 400 + Energieinfrastruktur in €/m²BGF	366	358	332	358	322
Investitionskosten KG 400 (nur Gebäude) in €/m²BGF	226	226	211	211	214
Jahresgesamtkosten in T€/a	80.604	79.923	79.180	79.430	79.015
Instandhaltungskosten Wärme in T€/a	1.243	1.145	609	891	652
Wärmepreis in €/MWh	171	153	137	137	133
Kosten Wärme je WE in €/Monat	59	53	47	47	46
Moderat					
Investitionskosten KG 400 + Energieinfrastruktur in €/m²BGF	428	421	385	412	378
Investitionskosten KG 400 (nur Gebäude) in €/m²BGF	280	280	259	259	263
Jahresgesamtkosten in T€/a	87.268	86.554	85.555	85.657	85.239
Instandhaltungskosten Wärme in T€/a	1.366	1.258	670	979	717
Wärmepreis in €/MWh	193	175	154	156	146
Kosten Wärme je WE in €/Monat	66	60	53	54	50
Progressiv					
Investitionskosten KG 400 + Energieinfrastruktur in €/m²BGF	459	452	412	438	406
Investitionskosten KG 400 (nur Gebäude) in €/m²BGF	309	309	285	285	289
Jahresgesamtkosten in T€/a	90.799	90.159	88.754	88.588	89.259
Instandhaltungskosten Wärme in T€/a	1.503	1.383	737	1.076	789
Wärmepreis in €/MWh	201	184	154	158	166
Kosten Wärme je WE in €/Monat	69	63	53	54	57
Moderat + Baukostensteigerung 3%/a (Randb. PGD)					
Investitionskosten KG 400 + Energieinfrastruktur in €/m²BGF	481	471	430	459	423
Investitionskosten KG 400 (nur Gebäude) in €/m²BGF	335	335	309	309	314
Jahresgesamtkosten in T€/a	103.390	102.632	101.103	101.424	100.837
Instandhaltungskosten Wärme in T€/a	1.366	1.258	670	979	717
Wärmepreis in €/MWh	217	197	166	172	158
Kosten Wärme je WE in €/Monat	75	68	57	59	54

Wirtschaftlichkeitsvergleich mit Diskontierungszinssatz von 4 %/a

	V 1_JaKo	V 2_JaKo	V 3_JaKo	V 4_JaKo	V 5_JaKo
Basis					
Investitionskosten KG 400 + Energieinfrastruktur in €/m²BGF	300	293	274	294	265
Investitionskosten KG 400 (nur Gebäude) in €/m²BGF	174	174	164	164	166
Jahresgesamtkosten in T€/a	86.652	85.981	85.047	85.588	84.790
Instandhaltungskosten Wärme in T€/a	1.084	1.002	532	781	569
Wärmepreis in €/MWh	169	152	128	133	125
Kosten Wärme je WE in €/Monat	58	52	44	46	43
Moderat					
Investitionskosten KG 400 + Energieinfrastruktur in €/m²BGF	344	338	313	333	306
Investitionskosten KG 400 (nur Gebäude) in €/m²BGF	211	211	197	197	200
Jahresgesamtkosten in T€/a	93.266	92.566	91.374	91.776	90.999
Instandhaltungskosten Wärme in T€/a	1.187	1.096	583	854	623
Wärmepreis in €/MWh	191	172	145	150	137
Kosten Wärme je WE in €/Monat	66	59	50	52	47
Progressiv					
Investitionskosten KG 400 + Energieinfrastruktur in €/m²BGF	370	363	335	355	328
Investitionskosten KG 400 (nur Gebäude) in €/m²BGF	233	233	218	218	221
Jahresgesamtkosten in T€/a	96.788	96.149	94.596	94.749	94.942
Instandhaltungskosten Wärme in T€/a	1.301	1.200	638	935	683
Wärmepreis in €/MWh	198	181	145	154	155
Kosten Wärme je WE in €/Monat	68	62	50	53	53
Moderat + Baukostensteigerung 3%/a (Randb. PGD)					
Investitionskosten KG 400 + Energieinfrastruktur in €/m²BGF	396	388	356	379	349
Investitionskosten KG 400 (nur Gebäude) in €/m²BGF	262	262	243	243	247
Jahresgesamtkosten in T€/a	111.217	110.445	108.760	109.372	108.425
Instandhaltungskosten Wärme in T€/a	1.187	1.096	583	854	623
Wärmepreis in €/MWh	215	194	156	167	149
Kosten Wärme je WE in €/Monat	74	67	54	57	51

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bauabschnitte (BA1-6) – Quelle: Entwurf Rahmenplan PGD	10
Abbildung 2: Flächen nach Nutzungsformen und Bauabschnitten – Quelle: Eigene Darstellung	11
Abbildung 3: Wärme- und Strombedarf Gesamt (Erzeugernutzenergie)	13
Abbildung 4: Durchdringung E-Ladesäulen in Quartiergaragen – Quelle: Eigene Darstellung	15
Abbildung 5: Photovoltaik-Potential gebäudeintegriert – Quelle: Eigene Darstellung.....	16
Abbildung 6: Favorisiertes Szenario hinsichtlich Lokation/Anzahl Grundwasserbrunnen (rot = Entnahmebrunnen, grün = Schluckbrunnen) – Quelle: KIT AGW Gutachten III Variante 8... 18	18
Abbildung 7: Systemlösung Firma Huber SE, Abwasserwärmetauscher und Abwasser-Entnahmebauwerk – Quelle: Huber SE	19
Abbildung 8: Energiekonzept Siegerentwurf städtebaulicher Wettbewerb – Quelle: Siegerentwurf Städtebaulicher Wettbewerb	21
Abbildung 9: Variante 1 – Versorgungsgebiet 1 Kalte Nahwärme und Regeneration mit Abwasserwärme – Quelle: Eigene Darstellung	22
Abbildung 10: Variante 2 – Zentrale Infrastruktur – Quelle: Eigene Darstellung.....	24
Abbildung 11: Variante 3 – Fernwärme Tiefengeothermie – Quelle: Eigene Darstellung	25
Abbildung 12: Variante 4 Energiezentrale.....	26
Abbildung 13: Variante 4 Technische Infrastruktur – Quelle: Eigene Darstellung.....	27
Abbildung 14: Variante 4 Ergebnisse Grundwassersimulation KIT-AGW – Quelle: KIT-AGW April 2021 Variante 8.....	28
Abbildung 15: Endenergiebilanz 2050.....	30
Abbildung 16: Klimabilanz 2050 (Szenario progressiv).....	31
Abbildung 17: Klimabilanz 2020 – 2050 (Szenario „moderat“).....	32
Abbildung 18: Klimabilanz 2020 – 2050 (Szenario „progressiv“)	32
Abbildung 19: Investitionskosten KG 420 + PV + Energieinfrastruktur	33
Abbildung 20: Investitionskosten KG 300 + 400 + Energieinfrastruktur	34
Abbildung 21: Jahresgesamtkosten (KG 420 + PV + Energieinfrastruktur)	35
Abbildung 22: Jahresgesamtkosten (KG 300 + 400 + Energieinfrastruktur)	36
Abbildung 23: Ergebnis Bewertungsmatrix	40

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kurzübersicht Bewertungskriterien.....	6
Tabelle 2: Übersicht der Anfangsinvestitionen	34
Tabelle 3: Jahresgesamtkosten nach Kostenkategorien.....	36
Tabelle 4: Jahresgesamtkosten und Wärmepreisberechnung	37
Tabelle 5: Ergebnis der Szenarienanalyse.....	39

Anlagenverzeichnis

1. Anlage: Bewertungsmatrix Bauliche Strukturen und Städtebau
2. Anlage: Ökonomischen Rahmenbedingungen
3. Anlage: Energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen
4. Anlage: Energiebedarf Binnen-Mobilität MIV und ÖPNV
5. Anlage: H₂-Trailerabfüllung Standort-Übersicht